

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ



ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΘΕΜΑ: Πειραματική μελέτη τóρνευσης δοκιμίων
σύνθετου υλικού πολυμερικής μήτρας
ενισχυμένης με υαλονήματα**

Φοιτητής: Βασίλειος Πανδής

Επιβλέπων καθηγητής: Δ. Μανωλάκος

ΑΘΗΝΑ 2019

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά την πραγματοποίηση των κατεργασιών αφαίρεσης υλικού επιβάλλεται να μελετηθούν, καθώς επηρεάζουν άμεσα τη διάρκεια ζωής του, ειδικά όταν πρόκειται για σύνθετο υλικό. Στόχος της συγκεκριμένης εργασίας είναι η συσχέτιση των δυνάμεων που αναπτύσσονται κατά την τόννευση υαλονήματος με την πρόωση, το βάθος κοπής και την ταχύτητα κοπής ώστε να βρεθεί ο παράγοντας που επηρεάζει άμεσα την τιμή αυτών των δυνάμεων.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντά μου, Καθηγητή Δ. Μανωλάκο για την ευκαιρία που μου έδωσε να μελετήσω αυτό το θέμα, καθώς και τον Δρ. Ν. Γαλάνη για τις πολύτιμες συμβουλές του, τη βοήθεια που μου προσέφερε απλόχερα κατά το σχεδιασμό πειραμάτων και τη γενική καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια υλοποίησης της συγκεκριμένης εργασίας. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον πατέρα μου για την αμέριστη στήριξη που μου πρόσφερε όλα αυτά τα χρόνια και τους φίλους και συμφοιτητές μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της συγκεκριμένης εργασίας είναι η διερεύνηση της συσχέτισης ανάμεσα στις δυνάμεις κοπής κατά την τόννευση υαλονήματος και των παραμέτρων που επηρεάζουν αυτές τις δυνάμεις. Οι παράμετροι που μελετήθηκαν ήταν η πρόωση (0.1 mm/rev, 0.3 mm/rev, 0.5 mm/rev), το βάθος κοπής (0.4 mm, 0.8 mm, 1.2 mm) και η ταχύτητα κοπής (50 m/min, 100 m/min, 150 m/min). Τα πειραματικά αποτελέσματα των δυνάμεων στους τρεις άξονες συντεταγμένων παρουσιάζονται και αναλύονται με ανάλυση παλινδρόμησης και ανάλυσης του signal-to-noise ratio. Η ανάλυση παλινδρόμησης πραγματοποιήθηκε με τρία μοντέλα, καθώς η συσχέτιση που έδινε δεν ήταν ικανοποιητική για όλες τις δυνάμεις. Και από τις δύο αναλύσεις προέκυψε πως η παράμετρος που επηρεάζει περισσότερο τις δυνάμεις που αναπτύσσονται είναι το βάθος κοπής, ακολουθεί η πρόωση και τελευταία έρχεται η ταχύτητα κοπής.

ABSTRACT

The aim of this paper is to investigate the correlation between the cutting forces during Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) turning and the parameters that affect these forces. The parameters studied were feed rate (0.1 mm/rev, 0.3 mm/rev, 0.5 mm/rev), depth of cut (0.4 mm, 0.8 mm, 1.2 mm) and cutting speed (50 m/min, 100 m/min, 150 m/min).. The experimental results of the forces on the three coordinate axes are presented and analyzed by regression analysis and Taguchi analysis. Regression analysis was performed with three models, as the correlation was not satisfactory for all forces. Both analyzes revealed that the parameter that most influences the developed forces is the cutting depth, the propulsion follows, and the cutting speed comes last.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1. Τόρνευση.....	1
1.2. Σύνθετα Υλικά.....	2
1.2.1. Σύνθετα υλικά με ίνες	4
1.3. Θεωρία Taguchi.....	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ	33
3.1. Σκοπός του πειράματος.....	33
3.2. Η πειραματική διάταξη	33
3.3. Διεξαγωγή του πειράματος.....	37
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ	39
4.1 Πειραματικά αποτελέσματα των δυνάμεων κοπής.....	39
4.2 Στατιστική ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων.....	40
4.2.1 Αποτελέσματα της ανάλυσης παλινδρόμησης για το απλό μοντέλο	40
4.2.2 Αποτελέσματα της ανάλυσης παλινδρόμησης για το μοντέλο με τον επιπλέον όρο του γινομένου των παραμέτρων	45
4.2.3 Αποτελέσματα της ανάλυσης παλινδρόμησης για το μοντέλο με τους επιπλέον όρους των τετραγώνων των παραμέτρων	42
4.3 Αποτελέσματα της ανάλυσης Taguchi	45
4.4 Φωτογραφίες από το στερεοσκόπιο του υλικού μετά την τóρνευση	54
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	56
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	57

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Τόρνευση

Τόρνευση είναι η κατεργασία κοπής με κύρια κίνηση την περιστροφική κίνηση της ατράκτου, όπου προσδένεται κατάλληλα το τεμάχιο προς κατεργασία, και δευτερεύουσα τη μεταφορική κίνηση της πρόωσης του κοπτικού εργαλείου η οποία εκτελείται με καθορισμένη γεωμετρία και απλή σημειακή επαφή [1].

Τα είδη της τόρνευσης χωρίζονται

A) Ανάλογα με τη διάταξη του άξονα τόρνευσης σε:

- Οριζόντια (οριζόντιος άξονας)
- Κατακόρυφη (κατακόρυφος άξονας)

B) Ανάλογα με τη θέση της κατεργαζόμενης επιφάνειας:

- Εξωτερική
- Εσωτερική

Γ) Ανάλογα με την αμοιβαία σχέση κύριας και δευτερεύουσας κίνησης:

- Διαμήκης τόρνευση, με κίνηση πρόωσης παράλληλη προς τον άξονα τόρνευσης
- Εγκάρσια τόρνευση, με κίνηση πρόωσης κάθετη προς τον άξονα τόρνευσης, η οποία διακρίνεται με τη σειρά της σε:
 1. Μετωπική
 2. Ακτινική
 3. Κωνική τόρνευση

Οι συνθήκες της κατεργασίας της τόρνευσης ρυθμίζονται κυρίως από τρεις βασικούς παράγοντες:

- Την ταχύτητα κοπής, $v(m/min)$, δηλαδή την σχετική ταχύτητα μεταξύ τεμαχίου και κοπτικού εργαλείου αναφερομένη στην κύρια κίνηση κοπής:

$$v(m/min): v = \pi D n \quad (1)$$

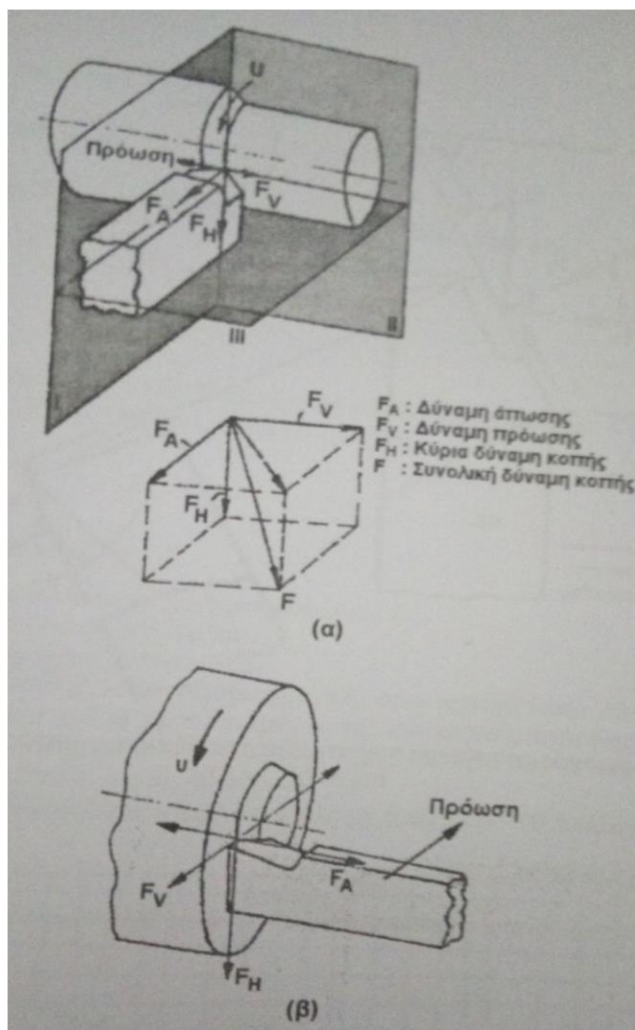
όπου: D η αρχική διάμετρος του τεμαχίου και n η ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου.

- Το βάθος κοπής, $a(mm)$, δηλαδή το βάθος διείσδυσης του κοπτικού εργαλείου μέσα στο τεμάχιο
- Την πρόωση, $s(mm/rev)$, δηλαδή την κατά τη διεύθυνση του άξονα περιστροφής του τεμαχίου μετακίνηση του κοπτικού εργαλείου ανά στροφή της ατράκτου.

Οι συνθήκες κοπής της κατεργασίας έχουν μεγάλη σημασία αφού από τον συνδυασμό των v, s και a εξαρτώνται κατά κύριο λόγο η ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας, ο χρόνος κατεργασίας, οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις και η καταναλισκόμενη ισχύς κοπής και η διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου. Επίσης, από αυτές τις συνθήκες επηρεάζονται τα χαρακτηριστικά του αποβλήτου.

Η συνολική δύναμη κοπής F αναλύεται στις ακόλουθες συνιστώσες, οι οποίες είναι ανά δύο κάθετες μεταξύ τους:

- F_H : Κύρια συνιστώσα δύναμης κοπής
- F_V : Δύναμη πρόωσης
- F_A : Δύναμη άπωσης του κοπτικού εργαλείου



Εικόνα 1.1. Αναπτυσσόμενες δυνάμεις κατά την (α) διαμήκη και (β) εγκάρσια τórνευση

1.2. Σύνθετα Υλικά

Η τεχνολογικά αναπτυσσόμενη κοινωνία μας προκαλεί διαρκώς τα όρια των συμβατικών υλικών και τις νεότερες απαιτήσεις όσον αφορά τις επιδόσεις των υλικών. Ακραίες και μερικές φορές αντιφατικές απαιτήσεις μας αναγκάζουν να κατασκευάζουμε υλικά που δεν είναι δυνατόν να κατασκευαστούν με συμβατικές μεθόδους κραματοποίησης [2], [3].

Τα σύνθετα υλικά προέρχονται από μια κατηγορία κατασκευασμένου υλικού ειδικά σχεδιασμένο για να ικανοποιήσει αυτή τη πρόκληση. Πρώτα εισήχθησαν

σύνθετες μήτρες ρητίνης ενισχυμένες με ύαλο στις αρχές της δεκαετίας του 1940 (Glass-reinforced resin matrix). Έκτοτε, η χρήση σύνθετων υλικών αυξάνεται συνεχώς σε διάφορες βιομηχανίες, συμπεριλαμβανομένης της αεροδιαστημικής, αεροσκαφών, αυτοκινήτων, αθλητικών ειδών, θαλάσσιες πλατφόρμες γεώτρησης, συσκευές, κ.λπ.

Τα σύνθετα υλικά αντικαθιστούν συνεχώς τα κανονικά μηχανολογικά υλικά λόγω των εξαιρετικών ιδιοτήτων τους, όπως η υψηλή αναλογία αντοχής σε βάρος, η υψηλή ειδική ακαμψία, η βελτιωμένη αντοχή στην κόπωση και η αντοχή ερπυσμού.

Ένα σύνθετο υλικό είναι ένας συνδυασμός δύο ή περισσότερων χημικά διακριτών και αδιάλυτων φάσεων. Η σύνθετη λέξη στον όρο σύνθετα υλικά σημαίνει ότι δύο ή περισσότερα από δύο υλικά συνδυάζονται σε μακροσκοπική κλίμακα για να σχηματίσουν ένα χρήσιμο τρίτο υλικό του οποίου οι ιδιότητες και η δομική απόδοση είναι ανώτερες από εκείνες των συστατικών τους όταν αυτά είναι ανεξάρτητα.

Τα σύνθετα υλικά σχηματίζουν ένα σύστημα υλικού που αποτελείται από ένα μείγμα ή ένα συνδυασμό δύο ή περισσότερων μακροσυνθετικών υλικών που διαφέρουν σε μορφή και χημική σύνθεση και είναι αδιάλυτα μεταξύ τους. Η μήτρα ή οι ενισχυμένες ίνες μπορεί να είναι ανόργανες (π.χ. κεραμικό ή γυαλί), οργανικές (πολυμερή), ή μεταλλικές (αλουμίνιο, τιτάνιο, κλπ.). Ενώ ο όρος σύνθετα υλικά μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε κράμα διπλής όψης (ανάλογα με την κλίμακα αναφοράς), συνήθως χρησιμοποιείται για να περιγράψει ένα υλικό των οποίων τα συστατικά δεν σχηματίζονται μαζί ως κράμα κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας, αλλά έχουν κατασκευαστεί χωριστά πριν από τη διαδικασία συνδυασμού. Αυτός ο ορισμός επεκτείνεται σήμερα στα σύνθετα υλικά τα οποία μπορούν να χυθούν απευθείας από το τήγμα με μονόδρομη στερεοποίηση ορισμένων κραμάτων ευτηκτικών συνθέσεων. Ωστόσο, για να χαρακτηριστεί ένα υλικό ως σύνθετο υλικό, πρέπει να είναι σε θέση να υποστηρίξει υψηλότερα επίπεδα τάσεων (stress) από το υλικό της μήτρας, να υφίστανται μεγαλύτερες πιέσεις από τις ίνες και οι ίνες πρέπει να είναι επαρκώς συνδεδεμένες με τη μήτρα.

Ο καθηγητής Dietz του MIT, πρωτοπόρος στον τομέα των σύνθετων υλικών, συνόψισε το θέμα ως εξής: "Η επιστήμη και η τεχνολογία, όπως η λογοτεχνία και οι καλές τέχνες, έχουν στη μόδα τους φράσεις και λέξεις-κλειδιά. Μία από αυτές που είναι στο προσκήνιο αυτές τις μέρες είναι «σύνθετα υλικά», τα οποία έχουν δημιουργηθεί για να δώσουν αξιοπρέπεια και ανανεώσιμη ώθηση σε μια πολύ παλιά αλλά και απλή ιδέα: το να βάζουμε ανόμοια υλικά για να δουλέψουν μαζί ώστε να επιτευχθεί ένα νέο υλικό του οποίου οι ιδιότητες είναι διαφορετικές σε κλίμακα και είδος από εκείνα από τα οποία προήλθαν." [4] Ο στόχος εδώ είναι να επωφεληθούμε των ανώτερων ιδιοτήτων και των δύο υλικών χωρίς να συμβιβάζομαστε με τις αδυναμίες του καθενός. Κατά μία έννοια, τα σύνθετα αποτελούν την τέχνη του συμβιβασμού στα καλύτερά του.

Αυτοί οι συμβιβασμοί προέρχονται από τα αποδεκτά επίπεδα αντοχής, ολκιμότητας, ανθεκτικότητας σε θραύση, αντοχής στην οξείδωση και στη διάβρωση, μέτρο, πυκνότητα, ερπυσμό, κόπωση, βάρος και κόστος. Ούτε τα σύνθετα υλικά ούτε η έννοια των σύνθετων υλικών μηχανικής είναι καινούρια. Το ξύλο είναι ένα φυσικό σύνθετο υλικό που αποτελείται από ίνες κυτταρίνης σε μια μήτρα λιγνίνης. Οι ίνες κυτταρίνης είναι ισχυρές σε τάση αλλά εύκαμπτες. η λιγνίνη τσιμεντοποιεί τις ίνες και προσδίδει στο υλικό ακαμψία. Το οστό είναι επίσης ένα σύνθετο υλικό από ισχυρό αλλά μαλακό πρωτεϊνικό κολλαγόνο και σκληρό αλλά ανόργανο απατίτη. Η εισαγωγή του άχυρου σε τούβλα από τους Αιγυπτίους στις ημέρες των Φαραώ, ή η ενσωμάτωση των φυτικών ινών σε κεραμικά στις ημέρες των Incas και Maya για να αποτρέπουν την πρόωρη πυρόλυση τους είναι κλασικά παραδείγματα κατασκευασμένων σύνθετων υλικών. Πολλά άλλα υλικά όπως το χαρτί, το σκυρόδεμα κ.λπ. χρησιμοποιούνται για αρκετό χρονικό διάστημα.

1.2.1. Σύνθετα υλικά με ίνες

Η επιτυχημένη ανάπτυξη πλαστικών ενισχυμένων με γυαλί τη δεκαετία του 1940 έδωσε μια άλλη προσέγγιση για την ανάπτυξη νέων υλικών. Η ιδέα της ενσωμάτωσης ινών ή μουςτακιών υψηλής αντοχής (κοντά στην θεωρητική αντοχή) σε μια σκληρή ή όλκιμη μήτρα ώστε να σχηματιστεί ένα πολύ υψηλής αντοχής σύνθετο υλικό άνοιξε το δρόμο για μια συναρπαστική δυνατότητα. Για παράδειγμα, ανακαλύφθηκε ότι οι ίνες γυαλιού έχουν σημαντικά μεγαλύτερη αντοχή από εκείνη του όγκου γυαλιού (με παραγγελία μεγέθους), λόγω της απουσίας ελαττωμάτων. Συνδυάζοντας ισχυρές υάλινες ίνες σε μια εποξική μήτρα, δημιουργήθηκε ένα νέο σύνθετο υλικό με την αντοχή των υάλινων ινών και την ολκιμότητα του εποξειδίου. Τα κυριότερα αποτελέσματα αυτού του συνδυασμού περιλαμβάνουν την εξοικονόμηση βάρους, τη βελτίωση της αντοχής και τη μείωση στο κόστος των υλικών και της κατασκευής.

Στο ενισχυμένο με ίνες σύνθετο υλικό, οι ίνες μεταφέρουν το μεγαλύτερο μέρος του φορτίου και η μήτρα χρησιμεύει ως μέσο για τη μεταφορά φορτίου στις ίνες. Η μήτρα μπορεί να είναι μέταλλο, πολυμερές ή κεραμικό υλικό και οι ίνες μπορούν να είναι επίσης από μέταλλο, πολυμερές ή κεραμικό υλικό, καθώς επίσης και από γυαλί.

Μερικά από τα πλεονεκτήματα των σύνθετων υλικών περιλαμβάνουν υψηλή ειδική ισχύ, υψηλή ειδική δυσκαμψία, καλή σταθερότητα διαστάσεων, ασυνήθιστο συνδυασμό των ιδιοτήτων που δεν μπορούν εύκολα να ληφθούν με κράματα, υψηλότερη αντοχή σε θραύση, υψηλότερη αντοχή οξείδωσης και διάβρωσης, καλή αντοχή στη θερμότητα, το κρύο και την υγρασία, ευκολία κατασκευής και χαμηλό κόστος.

Μερικές από τις ιδιότητες των κοινών ινών, των σύνθετων υλικών και μετάλλων με παρόμοιες ιδιότητες δίδονται στον Πίνακα 1. Προικισμένα με μερικά

από αυτά τα χαρακτηριστικά, τα σύνθετα υλικά είναι ιδανικά υποψήφια για μια σειρά εφαρμογών που συνεπάγονται ακραίες συνθήκες μη δυνατές με συμβατικό κράμα. Παραδείγματα περιλαμβάνουν εφαρμογές υψηλής αντοχής και ελαφρού τύπου (εκτοξευτήρες χώρου και οχήματα), υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας (μέρη κινητήρα αεριοστροβίλων) και αντίσταση σε σοβαρές (καταστρεπτικές) συνθήκες για περιορισμένο χρονικό διάστημα (ρουκέτες και διατάξεις προστασίας για οχήματα και πυραύλους που εισέρχονται ξανά στην ατμόσφαιρα της γης). Ωστόσο, τα σύνθετα υλικά δεν περιορίζονται σε ακραίες συνθήκες καθώς μπορούν να βρεθούν εφαρμογές τους υπό πιο συμβατικές συνθήκες εξαιτίας της ανώτερης απόδοσης ή / και του οικονομικού τους κόστους.

Πίνακας 1. Ιδιότητες ορισμένων κοινών ινών, σύνθετων υλικών και μετάλλων με παρόμοιες ιδιότητες [2]

	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ (g/cm ³)	OPIO GPa	ΕΙΔΙΚΟ OPIO GPa cm ³ /g	ANTOXH GPa	ΕΙΔΙΚΗ ANTOXH GPa cm ³ /g
Group I: Ceramic Whiskers					
Graphite	2.2	700	320	20	9.1
Silicon nitride	3.2	400	125	7	2.2
Silicon carbide	3.2	500	155	7	2.2
Alumina	4.0	420	105	14	3.5
Group II: Glass, Ceramic, or Polymer Fibers					
RAE (type I)	2.0	460	230	1.7	0.9
RAE (type II)	2.0	260	130	2.9	1.5
Boron	2.5	420	170	2.5	1.0
Asbestos	2.5	190	76	6	2.4
Mica	2.7	230	85	3	1.1
Nylon-6,6	1.1	5	4.5	0.8	0.7
E-glass as drawn	2.5	60	24	3	1.2
Group III: Hard-Drawn Metal Wires					
Piano (0.9% C)	7.8	210	27	4	0.5
Stainless steel	7.9	200	25	2.4	0.3
Molybdenum	10.3	365	35	2.1	0.2
Tungsten	19.3	345	18	2.9	0.1
Group IV: Composites and Other Higher Strength Materials					
Steel alloy-current	7.8	200	25	1.3	0.17
Al alloy	2.8	70	25	0.6	0.21
Ti alloy	4.5	115	26	1.0	0.22
Beryllium	1.8	300	170	0.5	0.28
Steel alloy-future 70% glass	8	200	25	5	0.65
Fiber epoxy					
Type 1	2	350	175	1.3-1.5*	0.6-2.5*
Type 2	2	200	100	2.3-5*	1.2-2.5*

*Current and projected values for uniaxial layup

Οι συμβατικές πρακτικές κατεργασίας, όπως η τόννευση και η διάτρηση εφαρμόζονται ευρέως στη μηχανική κατεργασία σύνθετων υλικών λόγω της διαθεσιμότητας εξοπλισμού και εμπειρίας σε συμβατικές μηχανικές κατεργασίες. Αν και μερικές από τις ίνες που χρησιμοποιούνται σε σύνθετα υλικά όπως είναι το γυαλί,

ο γραφίτης, το βόριο, το αλουμίνιο και το καρβίδιο του πυριτίου είναι σκληρές (μερικές φορές ίσες ή και σκληρότερες από το υλικό του εργαλείου κατεργασίας) και τραχιές, για αυτά τα υλικά χρησιμοποιούνται οι συμβατικές μηχανικές κατεργασίες επειδή αυτές οι ίνες είναι πολύ εύθραυστες και ο διαχωρισμός κατά τη μηχανική κατεργασία επιτυγχάνεται μπροστά από το εργαλείο με εύθραυστη θραύση και όχι με πλαστική παραμόρφωση. Ωστόσο, σε πολλές περιπτώσεις τα υλικά εργαλείων κοπής επιλέγονται για να ελαχιστοποιούν τη φθορά λόγω των σκληρών λειαντικών συστατικών των ινών.

Η κατεργασία ενός ενισχυμένου με ίνες σύνθετου υλικού εξαρτάται από τις ιδιότητες των ινών και της μήτρας καθώς και την απόκριση της στη διαδικασία κατεργασίας. Επιπλέον, η επιλογή της συγκεκριμένης διαδικασίας εξαρτάται από τους ακόλουθους παράγοντες: το είδος της μηχανουργικής κατεργασίας, τη γεωμετρία και το μέγεθος του τμήματος, το τελείωμα και την ακρίβεια των απαιτήσεων, τον αριθμό των εξαρτημάτων, την ποικιλία εξαρτημάτων συμπεριλαμβανομένων των υλικών των επιμέρους μερών, τη διαθεσιμότητα των κατάλληλων μηχανών και εργαλείων κοπής, την τρέχουσα πρακτική κατεργασίας, το χρονοδιάγραμμα της κατασκευής, τις κεφαλαιακές απαιτήσεις και το συνολικό κόστος.

Ορισμένες εργασίες μηχανουργικής επεξεργασίας ενδέχεται να μην είναι δυνατές με κάποια σύνθετα υλικά. Για παράδειγμα, δεν είναι δυνατό να υποβάλουμε σε κατεργασία το SiC whisker-reinforced αλουμίνιο με εργαλείο κοπής μονού σημείου, ακόμα και αν το κοπτικό είναι διαμάντι. Μπορεί, ωστόσο, να είναι δυνατή η διαμόρφωσή του με λείανση με διαμάντια ή με μερικές από τις μη συμβατικές διαδικασίες μηχανουργικής κατεργασίας, όπως η μηχανική κατεργασία με λέιζερ ή η υποβοηθούμενη από υπερήχους μηχανική κατεργασία. Σε άλλες περιπτώσεις μπορεί να είναι υποψήφιος περισσότερες από μία διαδικασίες και η συγκεκριμένη διαδικασία που επιλέγεται εξαρτάται από τους παράγοντες που περιγράφονται νωρίτερα.

Φυσικά, η γενική τάση είναι να χρησιμοποιούμε τις συμβατικές μηχανικές κατεργασίες με την υιοθέτηση του υπάρχοντος εξοπλισμού για την εφαρμογή αυτή. Αυτό είναι ιδιαίτερα αληθές σε μικρά μηχανουργεία εν όψει των περιορισμών κεφαλαίου για την προμήθεια νέων μηχανημάτων ή νέων τεχνολογιών. Αυτό όμως δεν συμβαίνει και με τις μεγάλες εταιρείες, όπως η Boeing, η Lockheed ή η General Dynamics, όπου οι πόροι αυτοί είναι ελεύθερα διαθέσιμοι, εφόσον δικαιολογείται η χρήση τους. Ακόμη και μια ιδιαίτερη διαδικασία που έχει επιλεγεί σε συγκεκριμένη χρονική περίοδο για την κατεργασία σύνθετων υλικών ίσως χρειαστεί να εγκαταλειφθεί σε μεταγενέστερη φάση λόγω των αλλαγών στους παράγοντες που περιγράφηκαν προηγουμένως. Για παράδειγμα, το μέγεθος της παρτίδας μπορεί να αυξηθεί σημαντικά, γεγονός που απαιτεί ανασκόπηση των εναλλακτικών διαδικασιών παραγωγής ή της νέας τεχνολογίας ή της τεχνολογίας που ασκείται επί

του παρόντος στο εργοστάσιο που μπορεί να είναι πλέον διαθέσιμη ή οικονομικά ελκυστική.

Τα πλαστικά ενισχυμένα με ίνες γυαλιού (Glass Fiber Reinforced Polymer – GFRP) που αναπτύχθηκαν τη δεκαετία του 1940 ήταν τα πρώτα ελαφριά, υψηλής αντοχής, σχετικά φθηνά σύνθετα υλικά. Οι πιο συνηθισμένοι τύποι ινών γυαλιού είναι το ηλεκτρικό γυαλί (E-glass) και το S-Glass (υψηλή αντοχή). Το E-glass είναι μια βοριοπυριτική αλουμίνας -ασβεστίου με χαμηλά επίπεδα νατρίου ή καλίου. Η τυπική σύνθεση ενός E-glass είναι 52-56% SiO₂, 12-16% Al₂O₃, 16-25% CaO και 8-13% B₂O₃. Το E-glass έχει αντοχή σε εφελκυσμό 500 ksi και μέτρο ελαστικότητας 10,5 X 10⁶ psi. Το S-glass έχει υψηλότερη ειδική αντοχή και είναι ακριβότερο από το E-glass (βλ. Πίνακα 2). Κατά συνέπεια, χρησιμοποιείται κυρίως στις στρατιωτικές και αεροδιαστημικές εφαρμογές για την ενίσχυση των μετάλλων ή των κεραμικών. Το εγγενώς υψηλό κόστος επεξεργασίας μετάλλου ή κεραμικής σύνθετης μήτρας καθιστά μη ελκυστική τη χρήση γυαλιού ως ενισχυτικού υλικού. Αντίθετα, η ελκυστικότερη επιλογή είναι η χρήση ακριβότερων υψηλών επιδόσεων ινών όπως το βόριο στην περίπτωση συνθέτων μεταλλικών πλεγμάτων (MMCs) και SiC στην περίπτωση σύνθετων υλικών κεραμικού πλέγματος (CMCs).

Πίνακας 2. Μηχανικές ιδιότητες των ινών. [2]

INA	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ (g/cm ³)	ΟΡΙΟ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ ksi	ΕΙΔΙΚΟ ΟΡΙΟ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ ×10 ⁶ in.	ΟΡΙΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ×10 ⁶ psi	ΕΙΔΙΚΟ ΟΡΙΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ×10 ⁸ in.
Kevlar-29	1.44	525	10.1	12	2.3
Kevlar-45	1.44	525	10.1	18	3.5
HT graphite	1.75	450	7.1	32	5.1
E-glass	2.55	350	3.8	10	1.1
S-glass	2.49	575	6.4	12.4	1.4
Boron	2.60	350	4.2	65	7.8

1.3. Θεωρία Taguchi

Οι παραδοσιακές μέθοδοι πειραματικής σχεδίασης παρουσιάζουν το μειονέκτημα πως είναι αρκετά περίπλοκες και επομένως είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθούν. Επιπλέον, όσο αυξάνεται ο αριθμός των παραμέτρων της διαδικασίας, αυτές οι μέθοδοι απαιτούν πολύ μεγάλο αριθμό πειραμάτων [4], [5]. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί ο αριθμός των απαιτούμενων δοκιμών, αναπτύχθηκε από τον Taguchi ένα ισχυρό εργαλείο για το σχεδιασμό υψηλής ποιότητας συστημάτων, η πειραματική μέθοδος σχεδιασμού Taguchi (Taguchi Design Of Experiment) [6].

Η μέθοδος Taguchi καθορίζει την ποιότητα ενός προϊόντος, από την σκοπιά της ζημίας από τη στιγμή που το προϊόν αποστέλλεται στον πελάτη. Μερικές από αυτές τις απώλειες οφείλονται σε απόκλιση κάποιου λειτουργικού χαρακτηριστικού του προϊόντος από την επιθυμητή τιμή -στόχο. Οι παράγοντες που ευθύνονται για τις

αποκλίσεις (παράγοντες θορύβου) είναι είτε εξωτερικοί όπως η θερμοκρασία και ο ανθρώπινος παράγοντας, ατέλειες κατασκευής ή αποκλίσεις λόγω φθοράς του προϊόντος. Γενικός στόχος του ποιοτικού ελέγχου αποτελεί η κατασκευή ανθεκτικών προϊόντων, αφού ληφθούν υπόψη όλοι οι παράγοντες θορύβου [7].

Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί έναν ειδικό σχεδιασμό ορθογωνικών πινάκων με σκοπό τη μελέτη ολόκληρου του διαστήματος των τιμών των παραμέτρων, χρησιμοποιώντας πολύ μικρό αριθμό πειραμάτων. Ο ορθογωνικός πίνακας επιλέγεται από τον χρήστη, ο οποίος λαμβάνει υπόψη του τον αριθμό των παραγόντων, τις αλληλεπιδράσεις και το επίπεδό τους. Στη μελέτη αυτή, χρησιμοποιήθηκαν ως παράγοντες ελέγχου τρεις παράμετροι μηχανουργικής κατεργασίας και έκαστος σχεδιάστηκε έτσι ώστε να έχει τρία επίπεδα, δηλ. 1, 2 και 3 (Πίνακας 3). Ο πειραματικός σχεδιασμός ήταν σύμφωνα με μια διάταξη L9 με βάση τη μέθοδο Taguchi, χρησιμοποιώντας τον ορθογωνικό πίνακα Taguchi, και κατά συνέπεια μειώνοντας σημαντικά τον αριθμό των πειραμάτων.

Πίνακας 3. Οι παράγοντες ελέγχου τριών επιπέδων που χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας

Παράμετροι μηχανουργικής κατεργασίας	Επίπεδο	Πρόωση (mm/rev)	Βάθος Κοπής (mm)	Ταχύτητα Κοπής (m/min)
1	1	0.1	0.4	50
	2	0.1	0.8	100
	3	0.1	1.2	150
2	1	0.3	0.4	100
	2	0.3	0.8	150
	3	0.3	1.2	50
3	1	0.5	0.4	150
	2	0.5	0.8	50
	3	0.5	1.2	100

Ο Taguchi συνιστά την ανάλυση της μέσης απόκρισης για κάθε διαδρομή στην εσωτερική συστοιχία και προτείνει επίσης την ανάλυση της μεταβολής χρησιμοποιώντας έναν κατάλληλα επιλεγμένο λόγο σήματος προς θόρυβο (S/N). Αυτοί οι λόγοι S/N προέρχονται από την τετραγωνική συνάρτηση απώλειας και τρεις από αυτούς θεωρούνται τυποποιημένες και ευρέως εφαρμόσιμες εξισώσεις.

1. Βέλτιστη Ονομαστική

$$\frac{S}{N} = 10 \log \frac{\bar{y}^2}{s^2} \quad (2)$$

2. Χαμηλότερη Βέλτιστη

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (3)$$

3. Υψηλότερη Βέλτιστη

$$\frac{S}{N} = -\log \frac{1}{n} \left(\sum \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (4)$$

Όπου \bar{y} είναι ο μέσος όρος των παρατηρούμενων δεδομένων, S^2 η διακύμανση του y , n είναι ο αριθμός των παρατηρήσεων και το y είναι τα παρατηρούμενα δεδομένα [8], [9].

Ανεξάρτητα από την κατηγορία των χαρακτηριστικών απόδοσης, ο χαμηλότερος λόγος S/N αντιστοιχεί σε καλύτερη απόδοση. Επομένως, το βέλτιστο επίπεδο των παραμέτρων της διαδικασίας είναι το επίπεδο με τη χαμηλότερη τιμή S/N . Η στατιστική ανάλυση των δεδομένων πραγματοποιήθηκε με ανάλυση της διακύμανσης (ANOVA) για τη μελέτη της συμβολής των παραγόντων και αλληλεπιδράσεων και για να διερευνηθούν τα αποτελέσματα της κάθε διαδικασίας στην παρατηρούμενη τιμή [10].

Ο Taguchi πρότεινε μια τυποποιημένη διαδικασία βελτιστοποίησης οποιασδήποτε παραμέτρου της διεργασίας [11]. Τα βήματα αυτής της διαδικασίας είναι:

- Προσδιορισμός των χαρακτηριστικών ποιότητας που πρέπει να βελτιστοποιηθούν.
- Προσδιορισμός των παραγόντων θορύβου και των συνθηκών δοκιμής.
- Προσδιορισμός των επιπέδων των παραγόντων ελέγχου και των εναλλακτικών τους επιλογών
- Ο σχεδιασμός του πειράματος μήτρας και ο καθορισμός των δεδομένων της διαδικασίας ανάλυσης.
- Διεξαγωγή του πειράματος μήτρας.
- Ανάλυση των δεδομένων και προσδιορισμός των βέλτιστων επιπέδων των παραγόντων ελέγχου.
- Πρόβλεψη της απόδοσης σε αυτά τα επίπεδα.

Η μέθοδος του Taguchi περιλαμβάνει τα εξής πέντε βήματα [12], [13], [14], [15]:

- i. Εύρεση μεταβλητών και των επιπέδων τους: οι μεταβλητές που επιλέγονται εξαρτώνται από τη φύση της διαδικασίας. Το επίπεδο σε κάθε μεταβλητή θα πρέπει να προσδιορίζεται έτσι ώστε να καλύπτει όσο το δυνατόν ευρύτερη περιοχή.
- ii. Προσδιορισμό ορθογωνικού πίνακα: Ο ορθογωνικός πίνακας καθορίζεται ανάλογα με τον αριθμό των μεταβλητών και τα επίπεδα τους.
- iii. Συλλογή δεδομένων: Τα δεδομένα πρέπει να συλλέγονται με τυχαία σειρά βασισμένη στον ορθογωνικό πίνακα.
- iv. Δημιουργία ANOVA: Από τα αποτελέσματα του ANOVA, μπορούν να βρεθούν οι σημαντικές μεταβλητές και το βέλτιστο επίπεδο σε κάθε μεταβλητή.
- v. Επιβεβαίωση των πειραματικών αποτελεσμάτων: Το βήμα επιβεβαίωσης είναι η διενέργεια των πειραμάτων επαλήθευσης και ο σχεδιασμός μελλοντικών ενεργειών.

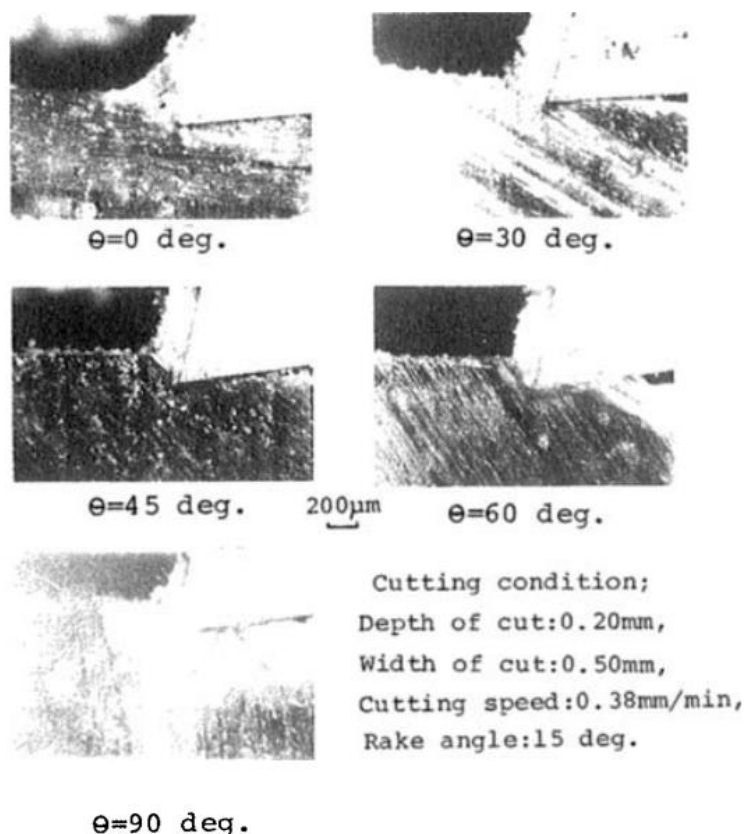
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ

ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

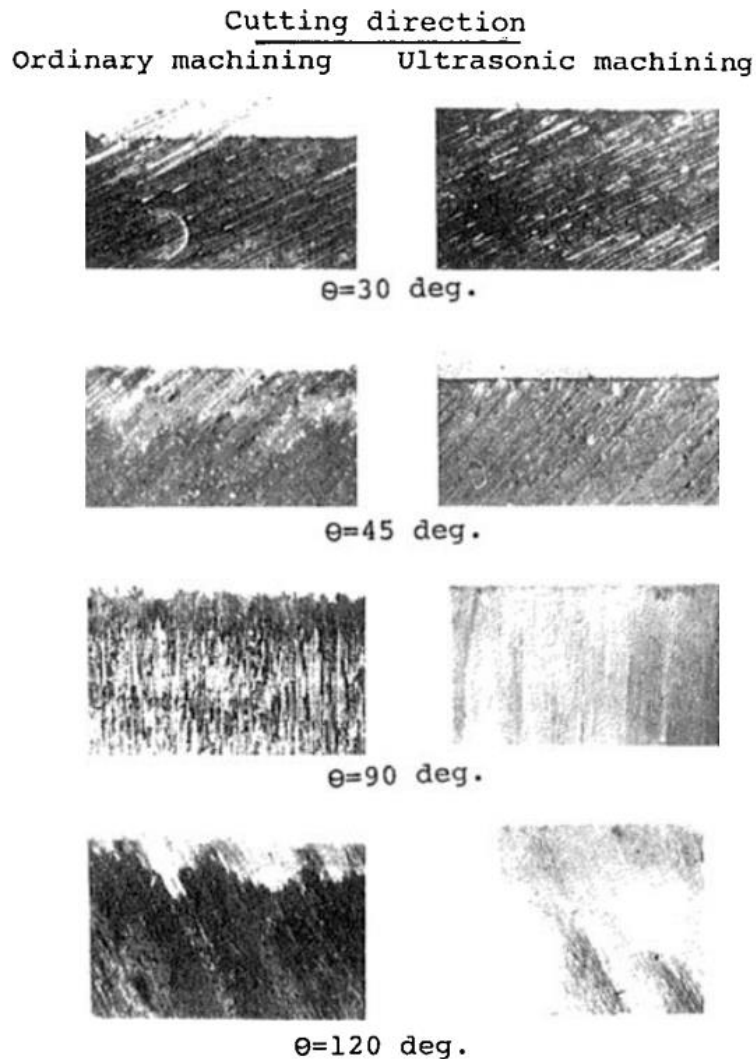
Με βάση τα παραπάνω είναι εμφανές πως η κατεργασία των σύνθετων υλικών με διαφορετικές μεθόδους και υπό διαφορετικές συνθήκες είναι μια περιοχή μελέτης η οποία παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον. Στις επόμενες παραγράφους θα παρουσιαστούν δημοσιευμένες εργασίες από τη διεθνή βιβλιογραφία που διερεύνησαν αυτό ακριβώς το κομμάτι.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί το υαλόνημα (GFRP) είναι απαραίτητη η κοπή του, η οποία όμως είναι δύσκολη λόγω της διαστρωματικής αποκόλλησης (delamination) του σύνθετου υλικού και τη μικρή διάρκεια ζωής του εργαλείου.

Σε μια μελέτη που πραγματοποιήθηκε πριν από περίπου 30 χρόνια, οι Takeyama και Iijma [16] περιέγραψαν τη διαδικασία σχηματισμού αποβλίττου σε μηχανική κατεργασία υαλονήματος. Παρατήρησαν ότι ο σχηματισμός αποβλίττου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον προσανατολισμό των ινών σε σχέση με την κατεύθυνση κοπής και επίσης πως σχηματίζονται απόβλιττα που μοιάζουν με μεταλλικά κατά την κατεργασία του σύνθετου υλικού με θερμοπλαστική μήτρα.



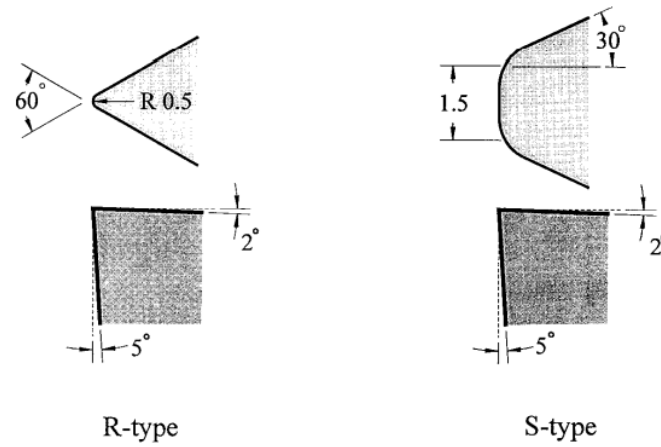
Εικόνα 2.1. Σχηματισμός αποβλίττου σε ορθογωνική κοπή υαλονήματος [17]



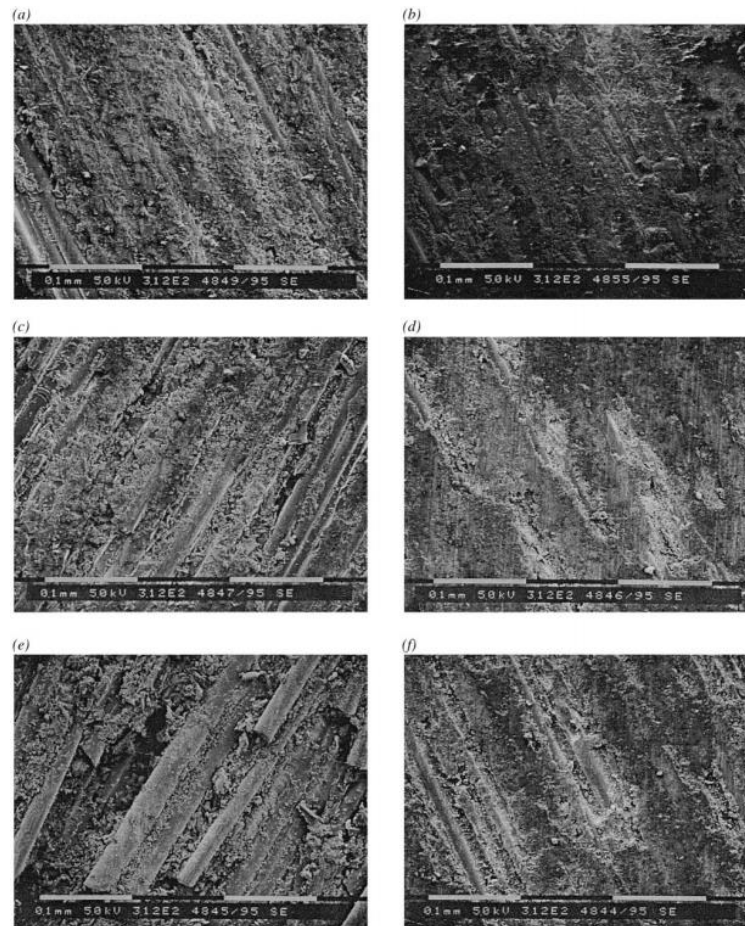
Εικόνα 2.2. Σύγκριση της πλάγιας όψης της κατεργασμένης επιφάνειας του υαλονήματος ανάμεσα στην συνηθισμένη μηχανική κατεργασία (αριστερά) και τη μηχανική κατεργασία με υπερήχους (δεξιά), για ταχύτητα κοπής 1m/min και βάθος κοπής 0,1mm [17]

Ο Lee [17] διερεύνησε πειραματικά την μηχανική κατεργασία του υαλονήματος (GFRP) στην τόννευση ακριβείας, χρησιμοποιώντας εργαλεία κοπής διαφορετικού υλικού και γεωμετρίας. Το δοκίμιο GFRP ήταν κυλινδρικό με γωνία ινών ίση με 45° , χρησιμοποιήθηκε τόννος CNC και η μέτρηση των δυνάμεων κοπής πραγματοποιήθηκε με δυναμόμετρο το οποίο τοποθετήθηκε στη βάση του κοπτικού εργαλείου. Η γεωμετρία των εργαλείων ήταν R-type με 0.5mm διάμετρο μύτης και S-type με 1.5mm ευθείας μύτης (Εικόνα 2.3). Τα υλικά των εργαλείων κοπής ήταν μονοκρυσταλλικό διαμάντι, πολυκρυσταλλικό διαμάντι και κυβικό νιτρίδιο του βορίου. Από τη μελέτη διαπιστώθηκε ότι το εργαλείο κοπής με μονοκρυσταλλικό διαμάντι συνιστάται για κοπή GFRP, καθώς η ποιότητα της επιφάνειας είναι καλή και η δύναμη κοπής χαμηλή. Επίσης, όσον αφορά τη γεωμετρία του εργαλείου, καλύτερη είναι αυτή με την ευθεία ακμή. Ακόμη, βρέθηκε πως τόσο η τραχύτητα όσο και η ποιότητα της επιφάνειας είναι καλύτερες στην κοπή GFRP με μειωμένο ρυθμό

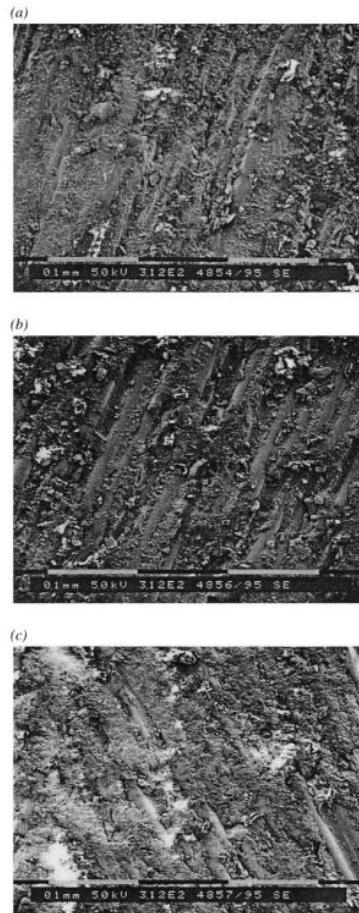
πρόωσης. Οι συχνότερες φθορές κατά τη διάρκεια κοπής GFRP είναι η πλευρική φθορά καθώς και η υποχώρηση και στρογγυλοποίηση της άκρης κοπής.



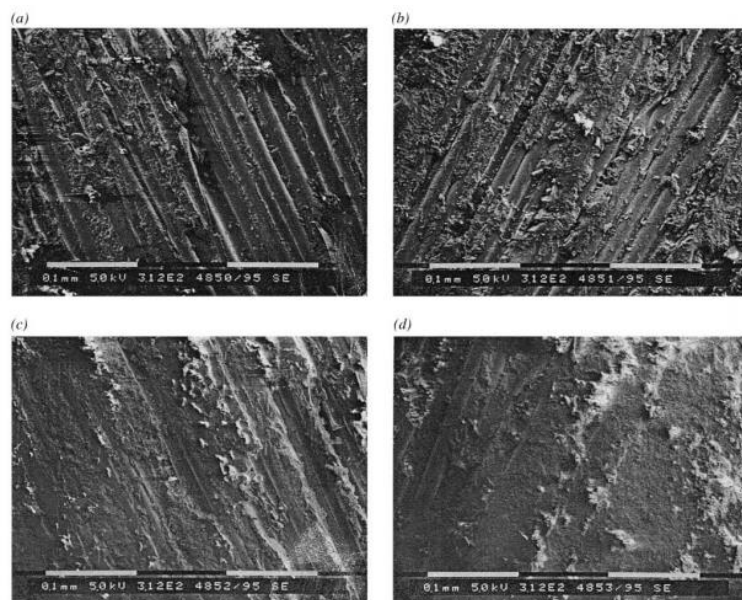
Εικόνα 2.3. Η γεωμετρία των εργαλείων που χρησιμοποίησε ο Lee στη μελέτη του [18]



Εικόνα 2.4. Φωτογραφίες της επιφάνειας κοπής για διαφορετικά υλικά εργαλείων και γεωμετρίες. $t = 1 \text{ mm}$, $f = 0,1 \text{ mm rev}^{-1}$, $v = 200 \text{ m min}^{-1}$. Μονοκρυσταλλικό διαμάντι a) τύπου R; (b) τύπου S. Πολυκρυσταλλικό διαμάντι: (c) τύπου R; (d) τύπου S. και κυβικό νιτρίδιο του βορίου (e) τύπου R; (f) τύπου S [18]

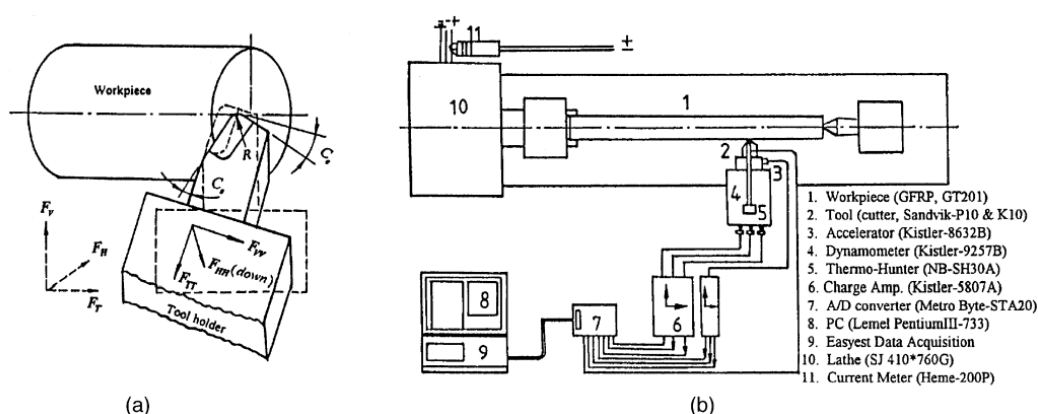


Εικόνα 2.5. Φωτογραφίες της επιφάνειας κοπής για διαφορετικό βάθος κοπής, $f = 0,1 \text{ mm rev}^{-1}$, $v = 200 \text{ m min}^{-1}$, με εργαλείο κοπής μονοκρυσταλλικό διαμάντι τύπου R (a) 2mm (b) 1mm (c) 0.5 mm [18]

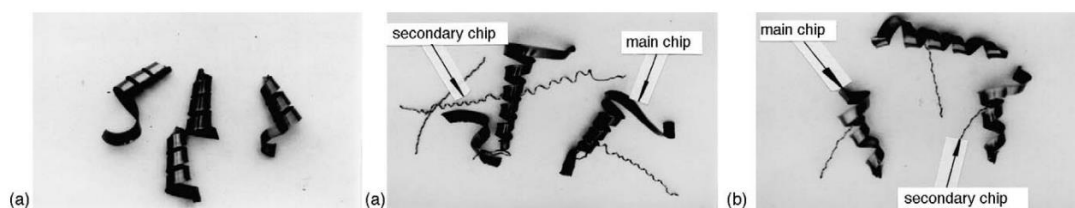


Εικόνα 2.6. Φωτογραφίες της επιφάνειας κοπής για διαφορετικό ρυθμό πρόωσης, $t = 1 \text{ mm}$, $v = 200 \text{ m min}^{-1}$, με εργαλείο κοπής μονοκρυσταλλικό διαμάντι τύπου R [18]

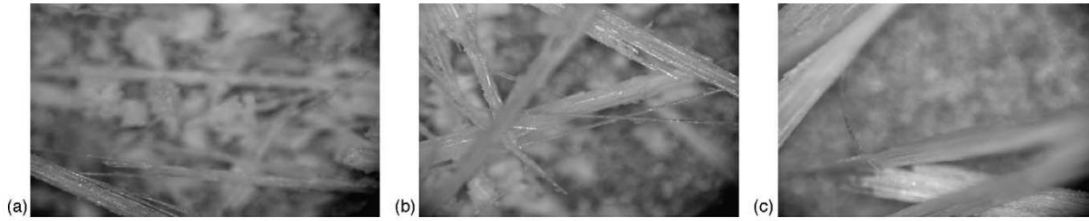
Ο Chang [18] διερεύνησε πειραματικά την μηχανική κατεργασία υαλονημάτων (GFRP) σε τórνευση με κοπτικά εργαλεία καρβιδίου τύπου Ρ και Κ. Η δοκιμή διερεύνησε τις δυνάμεις κοπής και τη θερμοκρασία κοπής κατά την περιστροφή του GFRP. Το δοκίμιο συγκρατείται στο σφιγκτήρα του τórνου και στο κοπτικό εργαλείο όπου βρισκόταν τοποθετημένο ένα δυναμόμετρο για τη μέτρηση τριών αξονικών δυνάμεων (F_H , F_V και F_T). Οι δοκιμές ξηρής κοπής διεξήχθησαν σε ένα τórνο υψηλής ταχύτητας 5 HP (SJ 600 × 700, 2000 rpm). Για τη μέτρηση των δυνάμεων κοπής χρησιμοποιήθηκε ένα πιεζοηλεκτρικό δυναμόμετρο τύπου Kistler 9257B με ένα σύστημα απόκτησης δεδομένων που αποτελείται από ενισχυτές φορτίου τύπου Kistler τύπου 5807A. Η παρακολούθηση της θερμοκρασίας στο άκρο κοπής πραγματοποιήθηκε με έναν ανιχνευτή υπερύθρων (Thermo Hunter), η καταγραφή των δεδομένων έγινε από ένα σύστημα συλλογής δεδομένων (Keithley Metro byte-DAS1600) και η ανάλυσή τους από το λογισμικό ελέγχου Easyst. Η αξιοπιστία των τεχνικών μέτρησης ελέγχθηκε πλήρως με την επανάληψη των πειραμάτων. Στο τέλος κάθε δοκιμής κοπής γινόταν μέτρηση της φθοράς του εργαλείου (VB) με τη βοήθεια ενός μικροσκοπίου εργαλειομηχανών. Από την συγκεκριμένη έρευνα αποδείχτηκε πως μικρότερη φθορά εργαλείου εμφάνισαν τα κοπτικά εργαλεία καρβιδίου τύπου Κ μεγάλης ακμής. Σε αυτό το αποτέλεσμα συντέλεσαν η υψηλότερη σκληρότητας και αντοχή στη φθορά των εργαλείων τύπου Κ, καθώς επίσης και ο χαμηλός συντελεστής τριβής σε συνδυασμό με την υψηλή θερμική αγωγιμότητα.



Εικόνα 2.7. Η πειραματική εγκατάσταση του Chang [19]



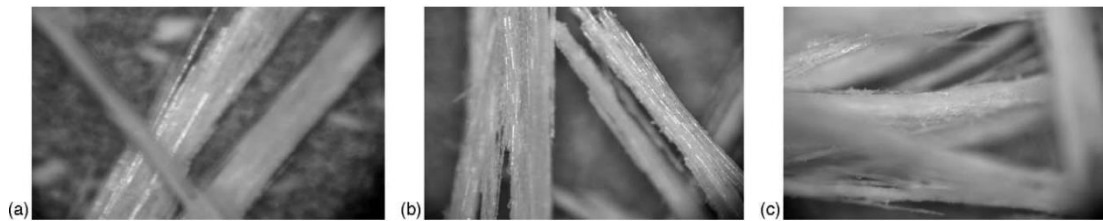
Εικόνα 2.8. Το σχήμα των αποβλίπτων (a) $a_{s1}(a_{s2}) = -10^\circ(10^\circ)$, (b) $a_{s1}(a_{s2}) = -20^\circ(20^\circ)$ και (c) $a_{s1}(a_{s2}) = -30^\circ(30^\circ)$ για $Cs=30^\circ$, $d=2.5$, $R=0.3$ και $V=140-148\text{m/min}$ (ανθρακούχος χάλυβας), μεγέθυνση $\times 30$ [19]



Εικόνα 2.9. Το σχήμα των αποβλίπτων με το εργαλείο τύπου K (a) $a_{s1}(a_{s2}) = -10^\circ(10^\circ)$, (b) $a_{s1}(a_{s2}) = -20^\circ(20^\circ)$ και (c) $a_{s1}(a_{s2}) = -30^\circ(30^\circ)$ για $Cs=20^\circ$, $d=2.5$, $R=0.3$ και $V=252\text{m/min}$ (υαλόνημα), μεγέθυνση $\times 80$ [19]



Εικόνα 2.10. Το σχήμα των αποβλίπτων με το εργαλείο τύπου P (a) $a_{s1}(a_{s2}) = -10^\circ(10^\circ)$, (b) $a_{s1}(a_{s2}) = -20^\circ(20^\circ)$ και (c) $a_{s1}(a_{s2}) = -30^\circ(30^\circ)$ για $Cs=20^\circ$, $d=2.5$, $R=0.3$ και $V=252\text{m/min}$ (υαλόνημα), μεγέθυνση $\times 80$ [19]



Εικόνα 2.11. Το σχήμα των αποβλίπτων με το εργαλείο τύπου K (a) $a_{s1}(a_{s2}) = -10^\circ(10^\circ)$, (b) $a_{s1}(a_{s2}) = -20^\circ(20^\circ)$ και (c) $a_{s1}(a_{s2}) = -30^\circ(30^\circ)$ για $Cs=30^\circ$, $d=2.5$, $R=0.3$ και $V=252\text{m/min}$ (υαλόνημα), μεγέθυνση $\times 80$ [19]



Εικόνα 2.12. Το σχήμα των αποβλίπτων με το εργαλείο τύπου P (a) $a_{s1}(a_{s2}) = -10^\circ(10^\circ)$, (b) $a_{s1}(a_{s2}) = -20^\circ(20^\circ)$ και (c) $a_{s1}(a_{s2}) = -30^\circ(30^\circ)$ για $Cs=30^\circ$, $d=2.5$, $R=0.3$ και $V=252\text{m/min}$ (υαλόνημα), μεγέθυνση $\times 80$ [19]

Οι Gupta και Kumar [19] προσδιόρισαν με τη βοήθεια πειραματικής μελέτης την επίδραση των παραμέτρων κοπής σε υαλονήματα μονής κατεύθυνσης κατά τη διάρκεια της τόννευσης και παρουσίασαν μια νέα μεθοδολογία για τη βελτιστοποίηση αυτών των παραμέτρων. Για τον πειραματικό σχεδιασμό χρησιμοποιήθηκε ο ορθογώνιος πίνακας L18 του Taguchi.

Η ποιότητα των περιστρεφόμενων εξαρτημάτων επηρεάζεται από τις ακόλουθες παραμέτρους:

- Παράμετροι κοπής: ταχύτητα κοπής, ταχύτητα πρόωσης, βάθος κοπής
- Παράμετροι περιβάλλοντος: στεγνό, υγρό, ψυχόμενο
- Παράμετροι εργαλείου κοπής: γεωμετρία εργαλείου, υλικό εργαλείου
- Υλικό κατασκευής: μέταλλα, σύνθετα υλικά

Όσον αφορά την πειραματική διαδικασία, ως δοκίμια χρησιμοποιήθηκαν σύνθετες ράβδοι υαλονήματος, πιο συγκεκριμένα πλαστικό σύνθετο υλικό ενισχυμένο με ίνες υάλου μονής κατεύθυνσης, που έχουν υποστεί επεξεργασία με εξώθηση και έχουν ενισχυθεί με εμβάπτιση σε εποξειδική ρητίνη. Η ράβδος που χρησιμοποιήθηκε είχε διάμετρο 42mm και μήκος 840mm.

Όλα τα πειράματα τόννευσης πραγματοποιήθηκαν σε τόννο NH22 ισχύος 11 kW με μέγιστη ταχύτητα 3000 rpm, ο οποίος βρίσκεται στο Εργαστήριο του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, του Πανεπιστημίου Kurukshetra της Ινδίας. Το εργαλείο κοπής που χρησιμοποιήθηκε για την πειραματική διαδικασία είναι πολυκρυσταλλικό εργαλείο διαμαντιού διαφορετικής γωνίας κλίσης και διαμέτρου μύτης. Η τραχύτητα της στρεφόμενης επιφάνειας μετρήθηκε με το όργανο τύπου Tokyo Seimitsu Surfcom 130A, το οποίο ήταν ρυθμισμένο σε μήκος αποκοπής 0,8mm με εγκάρσιο μήκος 4mm. Ως εργαλεία κοπής για τη μηχανική κατεργασία των υαλονημάτων επιλέχθηκαν πολυκρυσταλλικά διαμάντια.

Από τα πειραματικά αποτελέσματα είναι προφανές ότι η τραχύτητα της επιφάνειας και ο ρυθμός αποβολής υλικού αυξάνονται καθώς αυξάνεται ο ρυθμός πρόωσης. Ο κύριος παράγοντας ο οποίος έχει μεγάλη επίδραση στην τραχύτητα της επιφάνειας είναι ο ρυθμός πρόωσης και ακολουθούν το βάθος κοπής και η ταχύτητα κοπής.

Μια καλή επιφάνεια τόννευσης μπορεί να οδηγήσει σε βελτίωση των ιδιοτήτων αντοχής, όπως είναι η αντοχή στην κόπωση, η αντοχή στη διάβρωση, η ανοχή συναρμολόγησης, η ανοχή φθοράς, ο συντελεστής τριβής, η καθαρότητα, η θερμική αντίσταση, η αισθητική κλπ. Ταυτόχρονα, απαιτείται υψηλότερο ποσοστό απομάκρυνσης υλικού (Material Removal Rate - MRR) ώστε να είναι δυνατή η μαζική παραγωγή σε μικρότερο χρονικό διάστημα, χωρίς να θυσιάζεται η ποιότητα του προϊόντος. Το ποσοστό MRR αυξάνεται με την αύξηση των παραμέτρων της διαδικασίας όπως η ταχύτητα κοπής, η πρόωση και το βάθος κοπής. Πρέπει όμως να σημειωθεί πως με πολύ μεγάλη ταχύτητα κοπής ασκείται μεγαλύτερη δύναμη που μπορεί να υπερβεί την ισχύ που είναι διαθέσιμη στο μηχάνημα. Αυτό σημαίνει πως η αποτελεσματικότητα, η αποδοτικότητα και η συνολική οικονομία της κατασκευής όταν εφαρμόζονται μηχανικές κατεργασίες εξαρτώνται από την επιλογή κατάλληλων παραμέτρων της διαδικασίας.

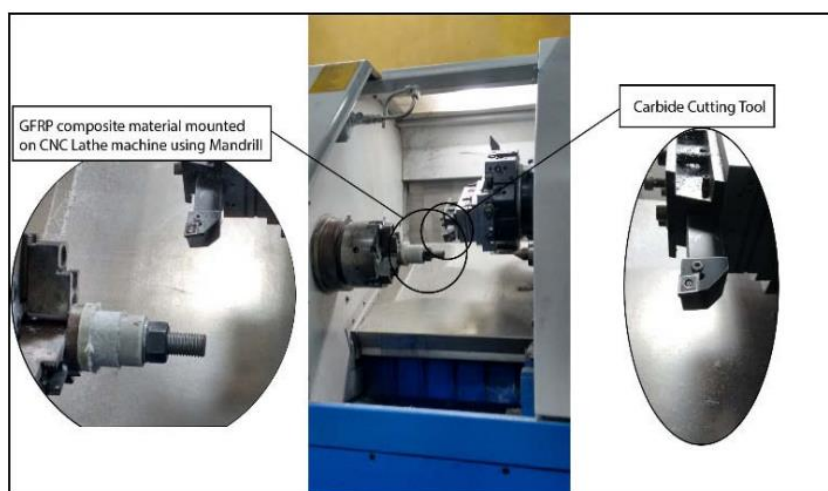
Οι Vasudevan et al. [20] έλαβαν υπόψη τους στη μελέτη τους τις ακόλουθες παραμέτρους τραχύτητας:

- Ra: Μέση αριθμητική τραχύτητα

- Rq: Τραχύτητα μέσης τιμής
- Rp: Μέγιστο ύψος τραχύτητας
- Rv: Ελάχιστο ύψος τραχύτητας

Το δοκίμιο που επιλέχθηκε για τη συγκεκριμένη πειραματική μελέτη ήταν το εποξειδικό σύνθετο υλικό, ενισχυμένο με ίνες γυαλιού, σωληνωτού τύπου μήκους 50mm, με εσωτερική διάμετρο 20mm και εξωτερική διάμετρο 55mm. Η ενίσχυση αποτελεί το 70% του όγκου του πολυμερούς και είναι από ύφασμα απλής ύφανσης, βάρους $180 \pm 5 \text{g/m}^2$ και πάχους 0,18mm. Η μήτρα του πολυμερούς υλικού αποτελείται από εποξειδική ρητίνη, το προϊόν Araldite LY3297 και το σκληρυντικό Aradur 3298. Ως εργαλείο κοπής χρησιμοποιήθηκε ένθετο καρβιδίου εξαιρετικής ποιότητας και τρεις διαφορετικοί τύποι ένθετων με ISO CNMG 120404, CNMG 120408 και CNMG 120412, που κατασκευάζονται από την SANDVIK Coromant.

Οι παράμετροι επιφανειακής τραχύτητας μετρήθηκαν με το όργανο Taylor Hobson Talysurf-5 με γκαουσιανό φίλτρο, μήκος αποκοπής 0,8mm, 5 αποκοπές και συνολικό μήκος διαδρομής 4mm. Η συλλογή δεδομένων πραγματοποιήθηκε με τη σύνδεση αυτού του profiler με τον υπολογιστή και χρησιμοποιώντας το λογισμικό Se-Surf. Η τόννευση πραγματοποιήθηκε με τον τόρνο Ace Jobber XL CNC (Εικόνα 2.13) που έχει μέγιστη ταχύτητα ατράκτου 4000 rpm και μέγιστη ισχύ 7.5 KW. Η μηχανική κατεργασία πραγματοποιήθηκε χωρίς ψυκτικό μέσο. Το δοκίμιο τοποθετείται σε ειδικά διαμορφωμένο άξονα, ο οποίος στη συνέχεια συσφίγγεται από τον σφιγκτήρα του τόρνου.



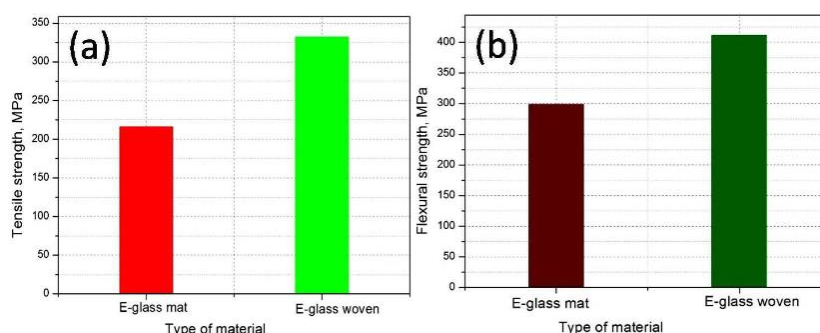
Εικόνα 2.13. Τόρνος CNC

Οι παράμετροι της πειραματικής διαδικασίας ήταν η ακτίνα του εργαλείου (A), η ταχύτητα κοπής (B), η ταχύτητα πρόωσης (C) και το βάθος κοπής (D) και μελετήθηκαν τρία επίπεδα εργασίας των παραμέτρων. Καθ' όλη τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας διατηρήθηκαν σταθερά το υλικό του δοκιμίου, το υλικό των εργαλείων, το περιβάλλον ξηρής κοπής και ο τρόπος στήριξης του εργαλείου. Ο σχεδιασμός των πειραμάτων βασίστηκε στη μέθοδο Taguchi. Σύμφωνα με τα

αποτελέσματα ο βέλτιστος συνδυασμός των παραμέτρων είναι ο εξής: ακτίνα της μύτης του εργαλείου 0,4mm, ταχύτητα κοπής 120mm/min, ταχύτητα πρόωσης 0,05mm/rev και βάθος κοπής 0,6mm.

Οι Parida et al. [21] χρησιμοποίησαν τη μέθοδο Taguchi, έναν ορθογωνικό πίνακα L9 για τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων κοπής της τραχύτητας της επιφάνειας κατά τη μηχανική κατεργασία των σύνθετων υλικών GFRP γραφίτη/τέφρας. Από την εργασία προέκυψε πως η πιο σημαντική παράμετρος για την καλύτερη δυνατή τραχύτητα επιφάνειας είναι ο ρυθμός πρόωσης και ακολουθεί το βάθος κοπής. Σε μεταγενέστερη μελέτη τους [22] υιοθέτησαν μια προσέγγιση Taguchi και απόκριση επιφανείας με στόχο τη βελτιστοποίηση της επιφανειακής τραχύτητας κατά την τόννευση του υαλονήματος GFRP. Οι παράμετροι εισόδου ήταν η ταχύτητα του άξονα, η πρόωση και η διάμετρος του τρυπανιού. Παρατηρήθηκε ότι η ταχύτητα της ατράκτου είναι η παράμετρος που επηρεάζει περισσότερο την τραχύτητα της επιφάνειας.

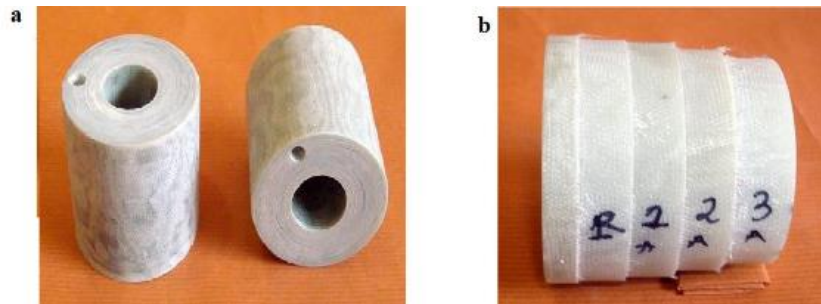
Οι Sivasankaran et al. [23] πραγματοποίησαν τόννευση σε σωλήνα κατασκευασμένο από ματ E-glass και σωλήνα E-glass με υαλοβάμβακα. Ως παράμετροι εισόδου επιλέχθηκαν ο ρυθμός πρόωσης, το βάθος κοπής και η ταχύτητα κοπής κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης της τραχύτητας της επιφάνειας. Παρατηρήθηκε ότι, όσο η ταχύτητα κοπής αυξανόταν, υπήρχε μείωση της τραχύτητας της επιφάνειας. Η τραχύτητα της επιφάνειας του υλικού εξαρτιόταν σε μεγάλο βαθμό από την ταχύτητα πρόωσης και το βάθος κοπής και πιο συγκεκριμένα η τραχύτητα της επιφάνειας ήταν μεγαλύτερη για το σύνθετο υλικό GFRP όταν ήταν αυξημένοι ο ρυθμός πρόωσης και το βάθος κοπής. Επίσης βρέθηκε πως η αντοχή σε εφελκυσμό και κάμψη του ματ E-glass ήταν μικρότερη από αυτή του E-glass με υαλοβάμβακα.



Εικόνα 2.14. Αντοχή σε (a) εφελκυσμό και (b) κάμψη του ματ E-glass και του E-glass με υαλοβάμβακα

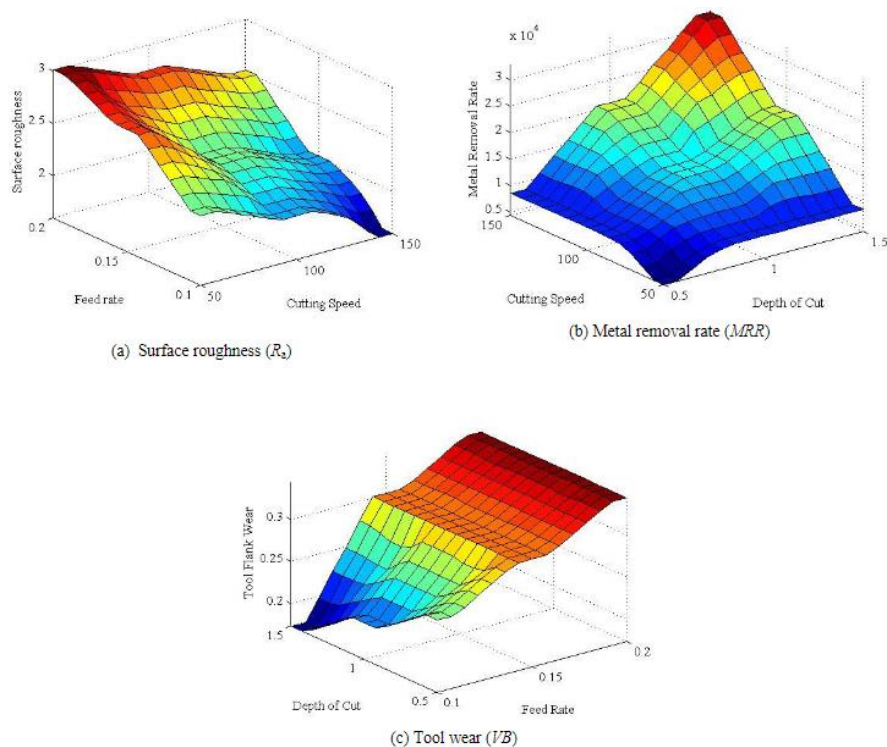
Οι Vasudevan et al. [24] εφάρμοσαν την πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση Grey Fuzzy (Grey Fuzzy Multi-Objective Optimization) σε συνδυασμό με την μέθοδο Taguchi στην τόννευση CNC του υαλονήματος. Οι παράμετροι εισόδου ήταν η ακτίνα της μύτης του εργαλείου, η ταχύτητα κοπής, ο ρυθμός πρόωσης και το βάθος κοπής και οι παράμετροι εξόδου η επιφανειακή τραχύτητα Ra, η εφαπτομένη δύναμη κοπής Fz και ο ρυθμός αποβολής υλικού MRR. Ως εργαλείο κοπής του τόρνου επιλέχθηκε

πολυκρυσταλλικό διαμαντι (PCD). Ο βέλτιστος συνδυασμός των παραμέτρων ήταν τελικά ακτίνα μύτης εργαλείου 0,8mm, ταχύτητα κοπής 120m/min, ρυθμός πρόωσης 0,05mm/rev και βάθος κοπής 1,6mm.



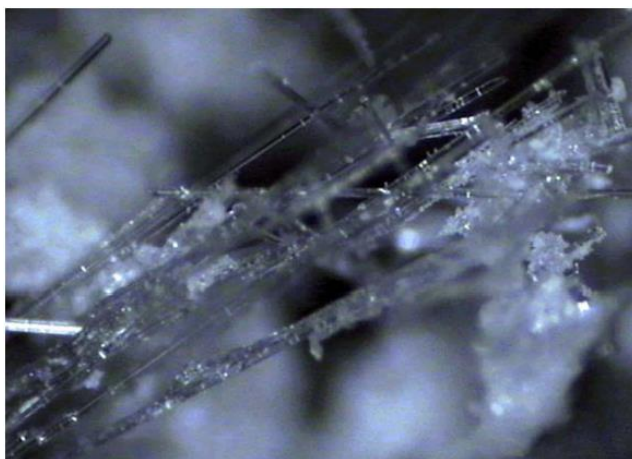
Εικόνα 2.15. Το δοκίμιο πριν (a) και μετά (b) την τόννευση [25]

Οι Sharma et al. [25] χρησιμοποίησαν την αφηρημένη λογική μοντελοποίησης (Fuzzy logic modelling) και την πολλαπλή βελτιστοποίηση της απόδοσης σε τόννευση σύνθετων GFRP χρησιμοποιώντας ανάλυση λειτουργικότητας. Οι μεταβλητές εισόδου ήταν η ταχύτητα κοπής, η ταχύτητα πρόωσης και το βάθος κοπής και οι αποκρίσεις ήταν η τραχύτητα επιφάνειας, ο ρυθμός αποβολής υλικού και η φθορά εργαλείων. Σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%, η έρευνά τους αποκάλυψε ότι το βάθος κοπής είναι η πιο σημαντική παράμετρος με συνεισφορά της τάξης του 39,38%, η οποία ακολουθείται από το ρυθμό πρόωσης και την ταχύτητα κοπής.

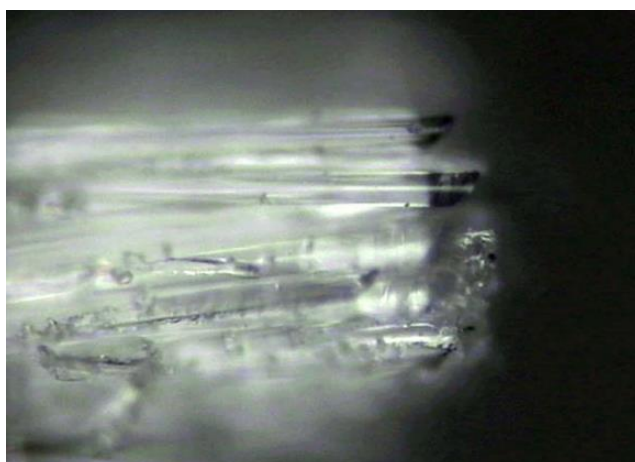


Εικόνα 2.16.. Επιφανειακή τραχύτητα (a), ρυθμός αποβολής υλικού (b) και φθορά εργαλείων (c), συναρτήσεϊ των παραμέτρων εισόδου [26]

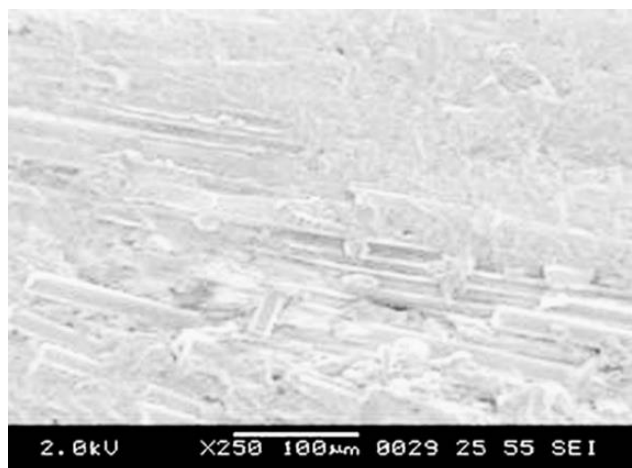
Οι Vijaya Kini et al. [26] μελέτησαν την επίδραση των μεταβλητών παραμέτρων τóρνευσης στην τραχύτητα της επιφάνειας και στον ρυθμό απομάκρυνσης υλικού, κατά την τóρνευση υαλονημάτων. Σε χαμηλές ταχύτητες κοπής υπήρχε μία μεγάλη ποσότητα ινών που κόπηκαν και προκάλεσαν μεγάλη τραχύτητα της επιφάνειας (Εικόνα 2.17). Σε υψηλές ταχύτητες κοπής παρατηρήθηκε ότι το υλικό της μήτρας παραμορφώθηκε σε μικρότερη έκταση προκαλώντας χαμηλότερη τραχύτητα επιφάνειας. Επιπλέον, η υψηλότερη θερμοκρασία του εργαλείου καίει τις ίνες και αλλάζει τη φυσική κατάσταση του υλικού μήτρας, κάνοντας έτσι την επιφάνεια πιο ομαλή (Εικόνα 2.18). Οι απεικονίσεις από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (Scanning Electron Microscope - SEM) (Εικόνες 2.19 και 2.20) δείχνουν την κατανομή των ινών για χαμηλά και υψηλά επίπεδα όλων των παραμέτρων. Τα αποτελέσματα της έρευνάς τους έδειξαν ότι πως η τραχύτητα της επιφάνειας επηρεάζεται κυρίως από τον ρυθμό πρόωσης και ακολουθούν το βάθος κοπής και ο ρυθμός αποβολής υλικού.



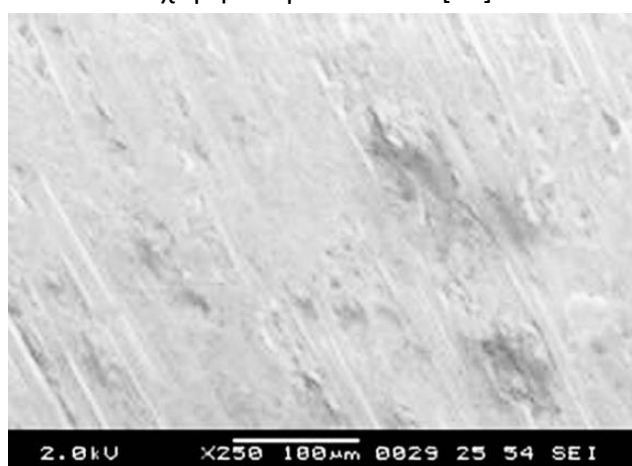
Εικόνα 2.17. Μικρογραφία του αποβλίττου (μεγέθυνση $\times 5$) [26]



Εικόνα 2.18. Μικρογραφία του αποβλίττου (μεγέθυνση $\times 20$), στην οποία φαίνονται οι καμένες ίνες και η μήτρα [26]



Εικόνα 2.19. Απεικόνιση SEM της επιφάνειας όταν όλες οι παράμετροι είναι στο χαμηλότερο επίπεδο [26]

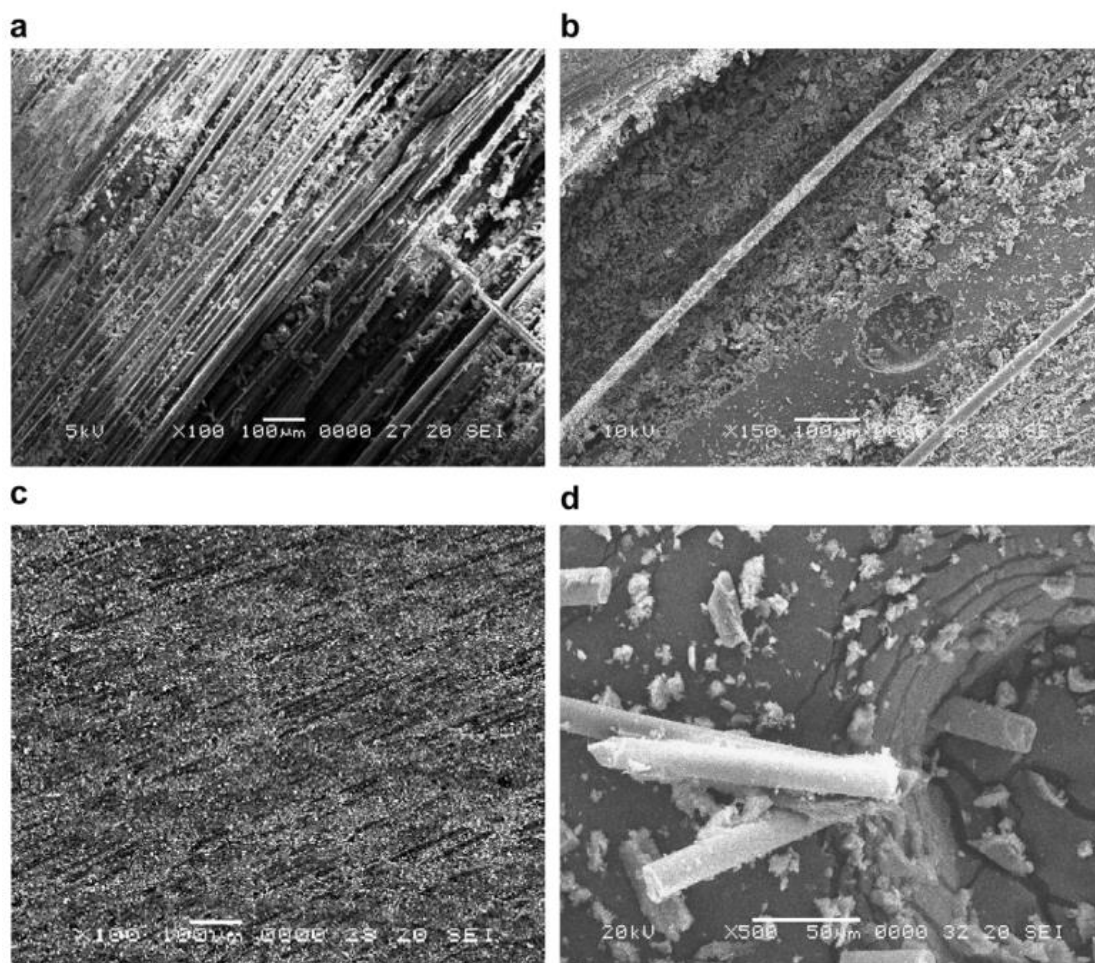


Εικόνα 2.20. Απεικόνιση SEM της επιφάνειας όταν όλες οι παράμετροι είναι στο υψηλότερο επίπεδο [26]

Ο Palanikumar [27] σχεδίασε και ανέλυσε την τραχύτητα της επιφάνειας κατά τη μηχανική κατεργασία υαλονημάτων, χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία επιφάνειας απόκρισης. Οι τέσσερις σημαντικές μεταβλητές εισόδου που εξετάστηκαν για την ερευνητική μελέτη ήταν η ταχύτητα κοπής, η γωνία προσανατολισμού των ινών, το βάθος κοπής και ο ρυθμός πρόωσης. Η μελέτη αποκάλυψε ότι η τραχύτητα της επιφάνειας κατά την τόννευση του GFRP αυξάνεται με την αύξηση του ρυθμού πρόωσης, αλλά μειώνεται με την αύξηση της ταχύτητας κοπής και του βάθους κοπής.

Η Εικόνα 2.21 δείχνει την απεικόνιση SEM των επιφανειών του δοκιμίου. Συγκεκριμένα, στην Εικόνα 2.21α φαίνεται η κατανομή των ινών στο σύνθετο υλικό και είναι εμφανές πως σε μερικές περιοχές η κατανομή είναι καλή ενώ σε άλλες η κατανομή δεν είναι ομοιόμορφη, εξαιτίας της μη ομοιόμορφης κατανομής των ινών τόσο στην κατασκευή όσο και στην εξαγωγή ινών κατά τη διάρκεια της μηχανουργικής κατεργασίας. Στην Εικόνα 2.21β απεικονίζεται το ανώτερο στρώμα του δοκιμίου μετά την μηχανουργική κατεργασία. Κανονικά στα ανώτερα στρώματα

των σύνθετων σωλήνων, η κατανομή των ινών είναι ελάχιστη και η περιεκτικότητα σε ρητίνη είναι μεγαλύτερη, όπως ακριβώς δηλαδή απεικονίζεται στην Εικόνα. Η Εικόνα 2.21c δείχνει την τυπική κατεργασμένη επιφάνεια μετά από τη μηχανουργική κατεργασία των σύνθετων GFRP [28]. Αυτό είναι το πιθανό φινίρισμα του δοκιμίου κατά τη διάρκεια της κατεργασίας των σύνθετων υλικών GFRP. Η Εικόνα 2.21d δείχνει την απεικόνιση SEM των κονιοποιημένων αποβλίπτων μαζί με τις σπασμένες ίνες. Η μαύρη περιοχή υποδεικνύει τη συγκεντρωμένη μάζα του υλικού της μήτρας σε μορφή σκόνης και οι λευκές κηλίδες τις σπασμένες ίνες.



Εικόνα 2.21. Απεικόνιση SEM των δοκιμών της μελέτης του Palanikumar [28]

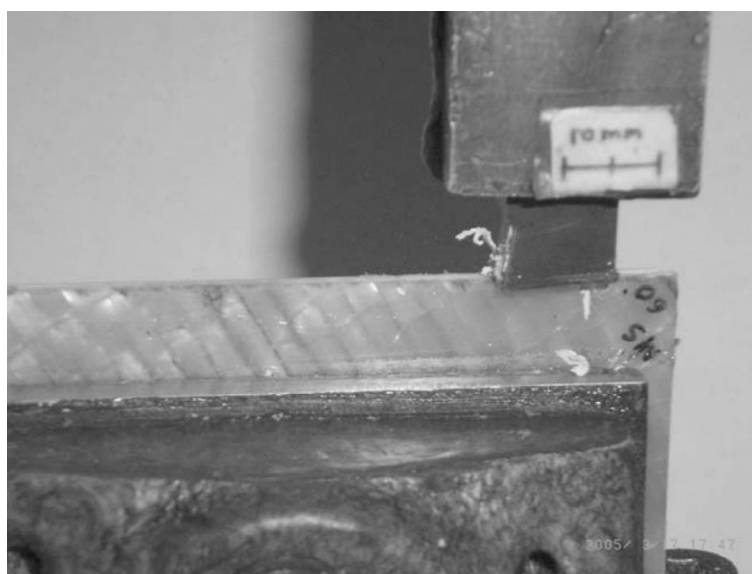
Οι Nayak et al. [29] μελέτησαν την επίδραση γεωμετρικών παραμέτρων και παραμέτρων διεργασίας στις ιδιότητες κατεργασίας των υαλονημάτων μονής κατεύθυνσης (Uni-Directional Glass Fiber Reinforced Plastic / UD-GFRP). Τα αποτελέσματα της μελέτης αναλύθηκαν σε όρους σχηματισμού αποβλίπτου, δυνάμεων κοπής και βλάβης των υπο-επιφανειών. Η πειραματική μελέτη πραγματοποιήθηκε σε φρέζα CNC και τα κοπτικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν ήταν συνδυασμός εργαλείων HSS και εργαλείων καρβιδίου. Στον Πίνακα 4 παρουσιάζεται η λίστα των πειραματικών παραμέτρων της μελέτης τους.

Πίνακας 4. Λίστα πειραματικών παραμέτρων [30]

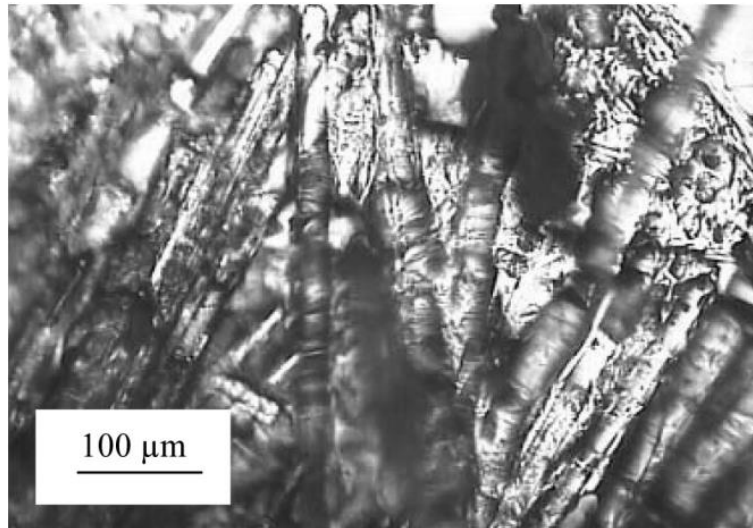
Δείγμα GFRP	
Προσανατολισμός ινών σε μοίρες	0, -15, -30, -45, -60, -75, -90
Γεωμετρία εργαλείου	
Εργαλείο HSS: Γωνία κλίσης σε μοίρες	+0, +5, +10, +20, +30, +40
Ακτίνας μύτης σε mm	50
Εργαλείο καρβιδίου: Γωνία κλίσης σε μοίρες	+10
Ακτίνας μύτης σε mm	20, 50 και 80
Παράμετροι διεργασίας	
Βάθος κοπής σε mm	0.1, 0.2 και 0.3
Ταχύτητα κοπής σε m/min	0.5

Το απόβλιττο που σχηματίζεται κατά τη διάρκεια της ορθογώνιας κατεργασίας των σύνθετων υλικών FRP έχει γενικά ασυνεχή χαρακτήρα, παρόλο που φαίνεται να είναι συνεχής κατά τη διάρκεια της καταγραφής της διαδικασίας σχηματισμού του. Ωστόσο, μια προσεκτικότερη ματιά δείχνει ότι το απόβλιττο που σχηματίζεται είναι εντελώς ασυνεχές και έχει τη μορφή κομματιών, στοιβαγμένα το ένα πάνω από το άλλο. Στην Εικόνα 2.22 παρουσιάζεται μια χαρακτηριστική φωτογραφία της διαδικασίας σχηματισμού αποβλίττου για θετική γωνία κλίσης 10 μοιρών σε βάθος κοπής 0,2mm και στην Εικόνα 2.23 μια τυπική μικροσκοπική φωτογραφία του αποβλίττου. Στις Εικόνες 2.24 έως και 2.27 φαίνονται το απόβλιττο και οι σπασμένες ίνες διαφορετικού προσανατολισμού για εργαλείο με θετική γωνία κλίσης 10, 20, 30 και 40 μοιρών, αντίστοιχα. Γενικά παρατηρείται μείωση του μεγέθους του αποβλίττου και του μήκους των σπασμένων ινών με την αύξηση του προσανατολισμού των ινών.

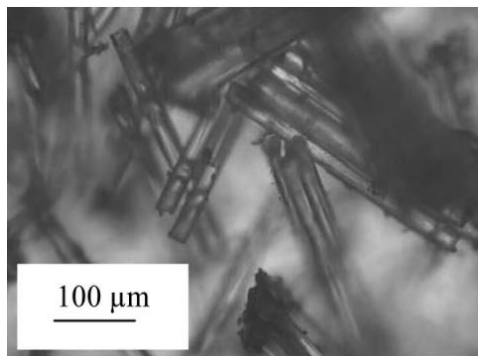
Η υπο-επιφανειακή βλάβη ποσοτικοποιείται με μη καταστρεπτική μελέτη διείσδυσης φθορίζουσας βαφής, η οποία ψεκάζεται σε όλη την κατεργασμένη άκρη του δείγματος και διεισδύει πλήρως στις κοιλότητες και στις ρωγμές που



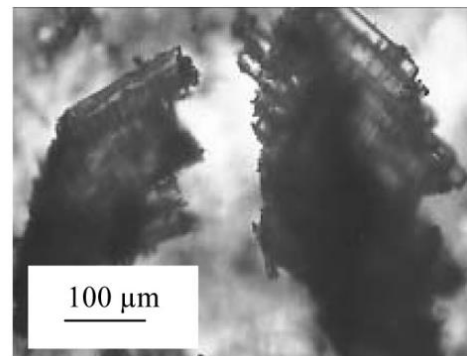
Εικόνα 2.22. Διαδικασία σχηματισμού αποβλίττου για θετική γωνία κλίσης 10 μοιρών σε βάθος κοπής 0,2mm [30]



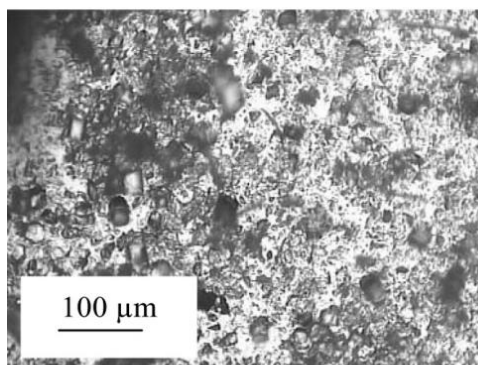
Εικόνα 2.23. Τυπική μικροσκοπική φωτογραφία του αποβλίττου [30]



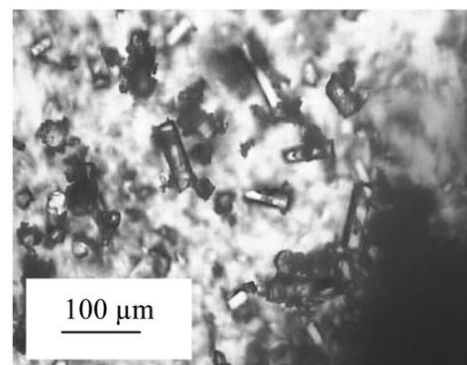
(a)



(b)



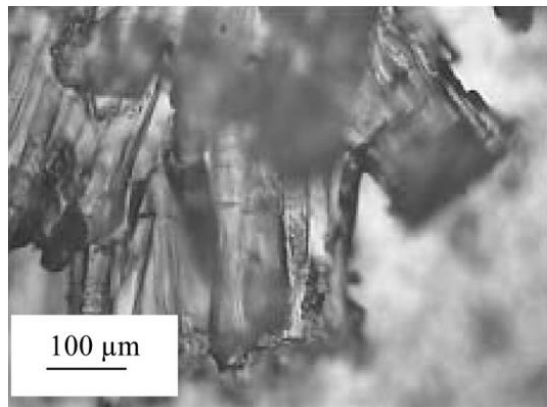
(c)



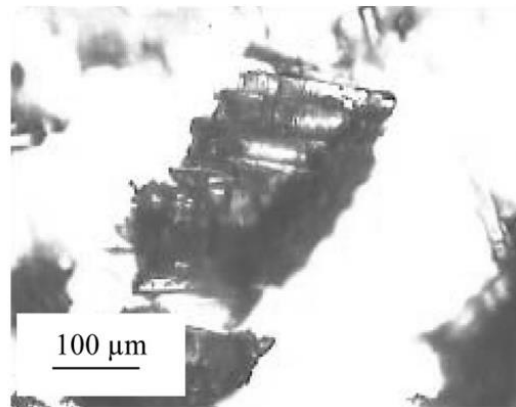
(d)

Εικόνα 2.24. Απόβλιττο και σπασμένες ίνες για εργαλείο με θετική γωνία κλίσης 10 μοιρών και προσανατολισμό ινών (a) -30°, (b) -60°, (c) -75°, (d) -90° [30]

δημιουργούνται κατά την ορθογώνια κοπή. Όταν το δοκίμιο εκτίθεται σε μια υπεριώδη (UV) πηγή φωτός η φθορίζουσα βαφή φωτίζεται και δίνει μια ένδειξη για την έκταση της εσωτερικής βλάβης. Η Εικόνα 2.28 δείχνει την μεταβολή της βλάβης της υποεπιφάνειας με διαφορετικό προσανατολισμό των ινών.

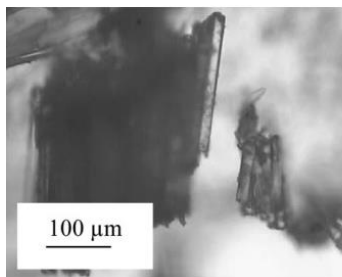


(a)

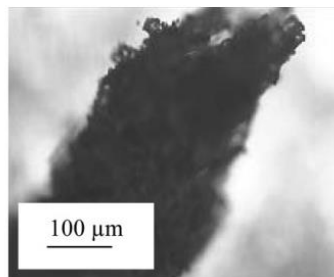


(b)

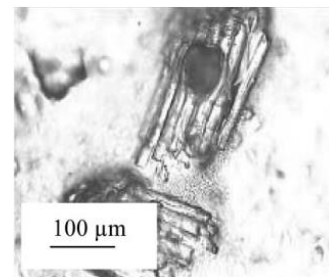
Εικόνα 2.25. Απόβλιττο και σπασμένες ίνες για εργαλείο με θετική γωνία κλίσης 20 μοιρών και προσανατολισμό ινών (a) -45° , (b) -75° [30]



(a)

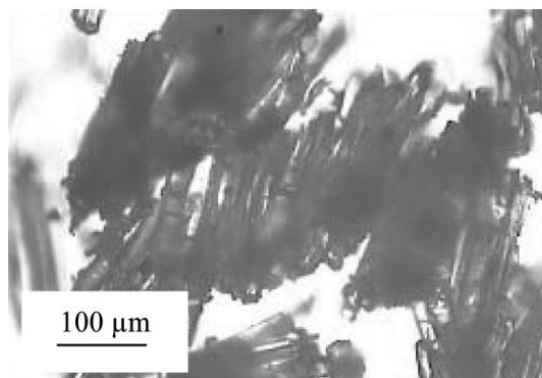


(b)

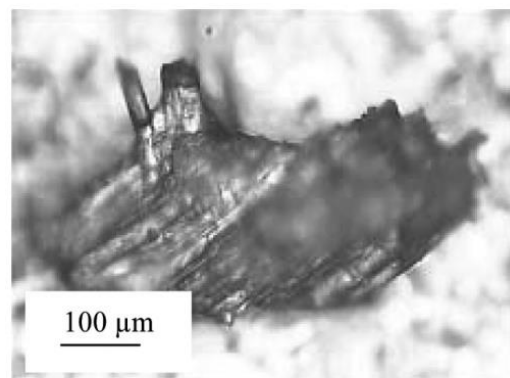


(c)

Εικόνα 2.26. Απόβλιττο και σπασμένες ίνες για εργαλείο με θετική γωνία κλίσης 30 μοιρών και προσανατολισμό ινών (a) -60° , (b) -75° , (c) -90° [30]

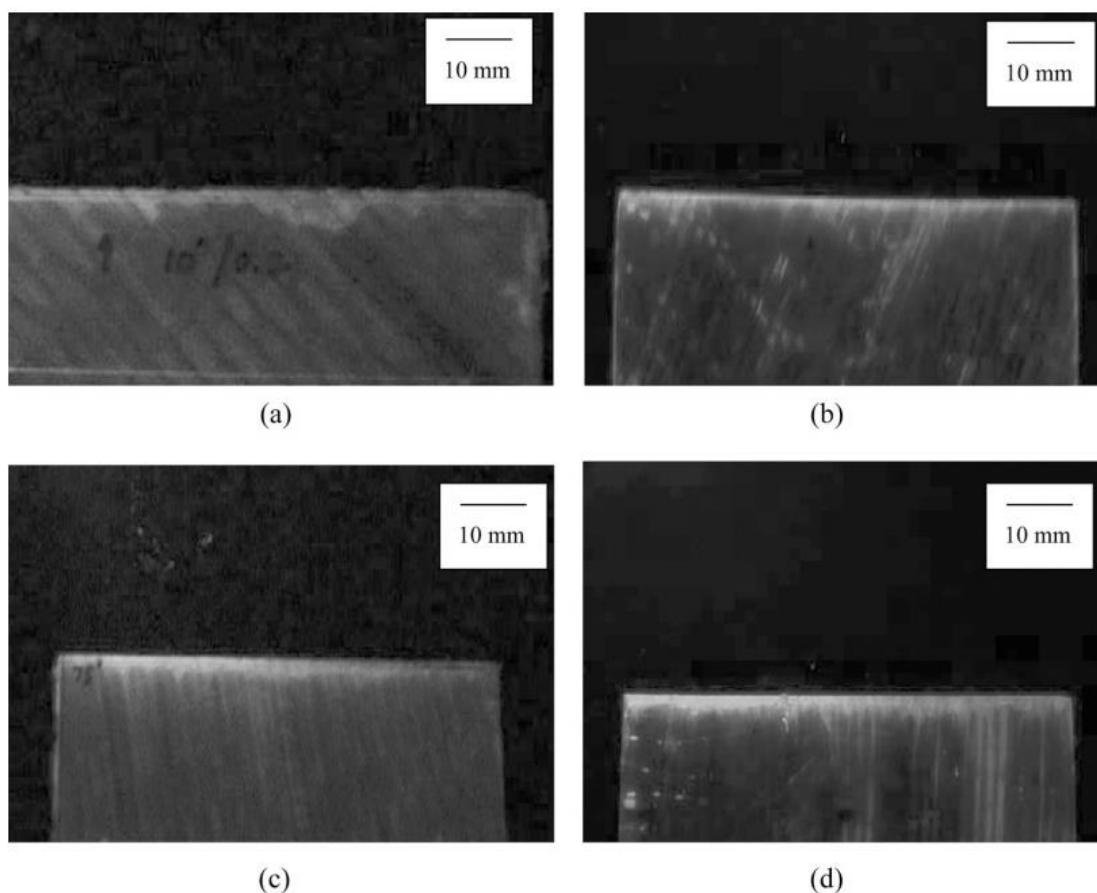


(a)



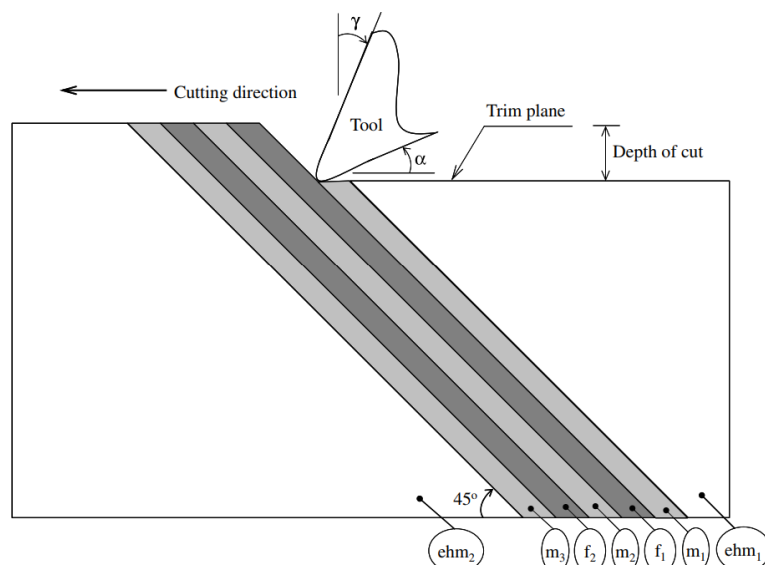
(b)

Εικόνα 2.27. Απόβλιττο και σπασμένες ίνες για εργαλείο με θετική γωνία κλίσης 40 μοιρών και προσανατολισμό ινών (a) -75° , (b) -90° [30]

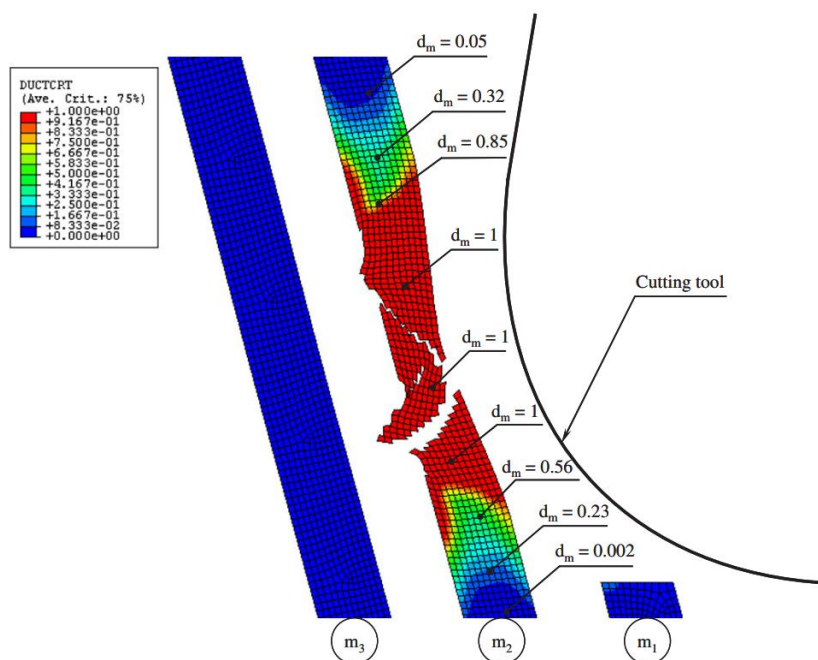


Εικόνα 2.28. Ψηφιακές φωτογραφίες των δοκιμών UD-GFRP που παρουσιάζουν τη διείδυση της φθορίζουσας χρωστικής ουσίας για προσανατολισμό ινών (a) -45° , (b) -60° , (c) -75° , (d) -90° [30]

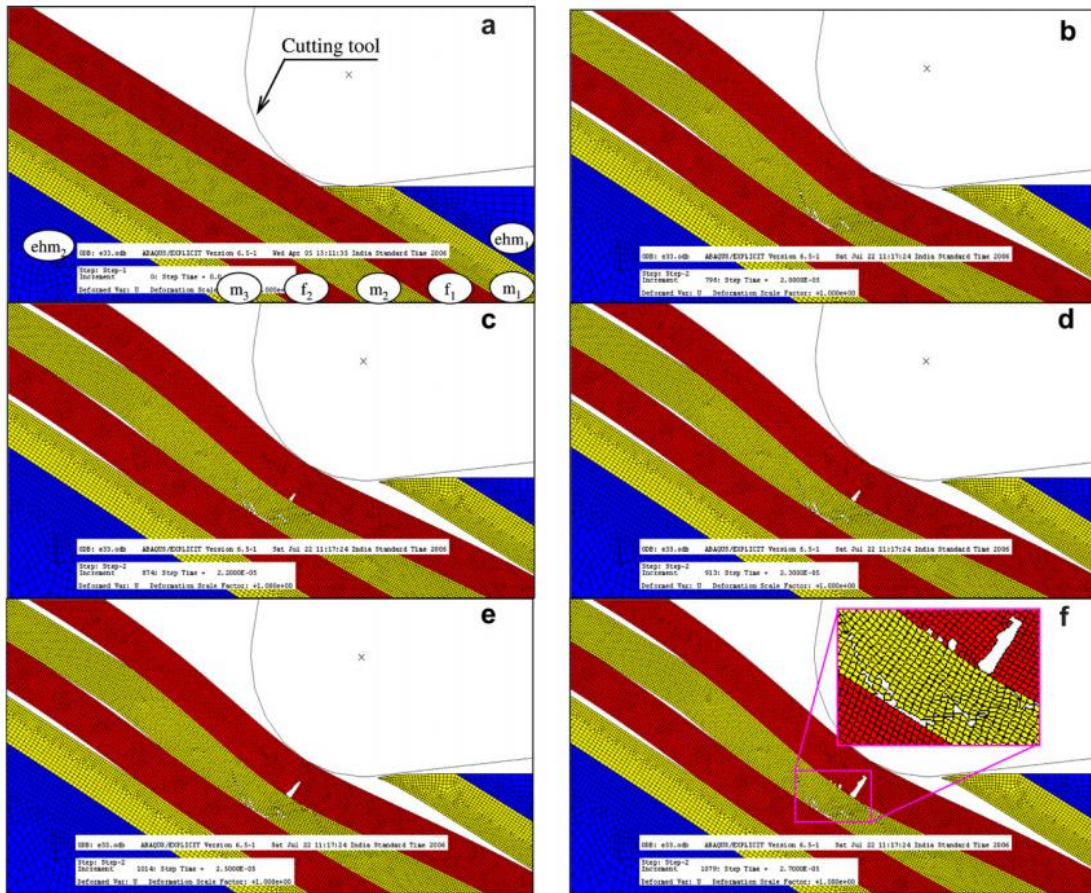
Οι Rao et al. [30] μελέτησαν υπολογιστικά τον μηχανισμό σχηματισμού στην ορθογώνια μηχανική κατεργασία υαλονήματος μονής κατεύθυνσης (UD-GFRP) χρησιμοποιώντας ημι-στατική (quasi-static) ανάλυση. Το μοντέλο τους ήταν δισδιάστατο με ελαστικές ίνες, ελαστοπλαστική μήτρα και μια συνεκτική ζώνη για την προσομοίωση της διεπαφής αποκόλλησης μεταξύ της ίνας και της μήτρας. Τα στοιχεία της ίνας σπάνε μόλις η μέγιστη κύρια τάση φθάσει στην αντοχή εφελκυσμού και το μέτρο ελαστικότητας της μήτρας μειώνεται μόλις η τάση γίνει ίση με το όριο ελαστικότητας. Επίσης ανέλυσαν την επίδραση του προσανατολισμού των ινών, των παραμέτρων του εργαλείου και της λειτουργίας στην αστοχία της ίνας και της μήτρας, καθώς επίσης και στο μέγεθος του αποβλήτου. Αρχικά παρουσιάζεται καταστροφή της γειτονικής στην ίνα μήτρας, η οποία στη συνέχεια προκαλεί βλάβη στην πίσω πλευρά της ίνας.



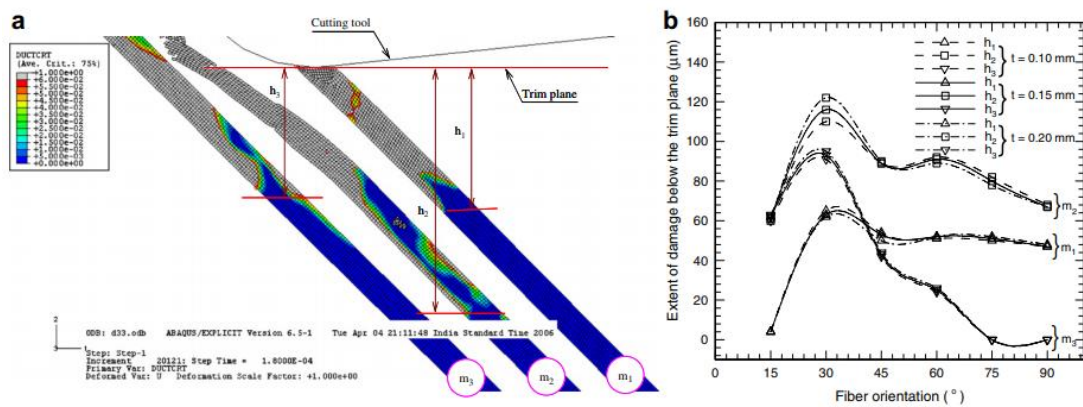
Εικόνα 2.29. Σχηματική απεικόνιση των περιοχών της ίνας, της μήτρας και του ισοδύναμου ομοιογενούς υλικού (Equivalent Homogeneous Material – EHM) που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για προσανατολισμό ινών 45° [31]



Εικόνα 2.30. Ποσοτική μεταβολή της μεταβλητής βλάβης σε διάφορα στοιχεία της μήτρας για προσανατολισμό ινών 75° [31]

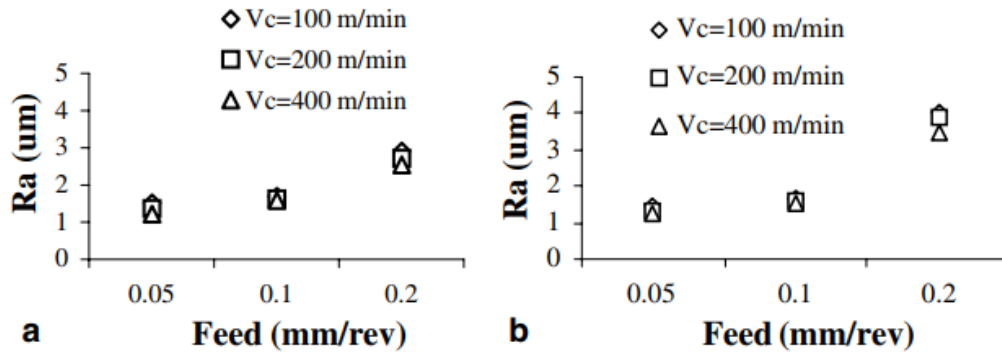


Εικόνα 2.31 Βλάβες στη μήτρα και στις ίνες κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης για προσανατολισμό ίνας 30° , βάθος κοπής 0,2 mm και μετατοπίσεις του εργαλείου (a) 0 μm , (b) 20,1 μm , (c) 21 μm , (d) 21,2 μm , (e) 21,3 μm και (f) 21,41 μm [31]

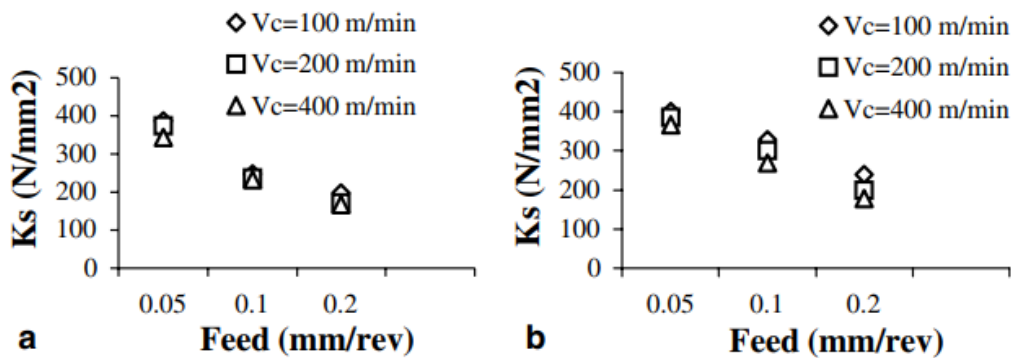


Εικόνα 2.32. (α) Η μέτρηση της βλάβης της υπο-επιφανείας της μήτρας (m_1 , m_2 , m_3) για $h = 45$, $t = 0,1$ mm. β) την έκταση της βλάβης κάτω από το επίπεδο κοπής (υπο-επιφανειακή βλάβη) της μήτρας για διάφορα βάθη κοπής και προσανατολισμό ινών σε σταθερή γωνία κλίσης 10° , όπου h_1 , h_2 και h_3 είναι τα βάθη της ζημιάς μετρούμενα από το επίπεδο κοπής στη μήτρα m_1 , m_2 και m_3 αντίστοιχα [31]

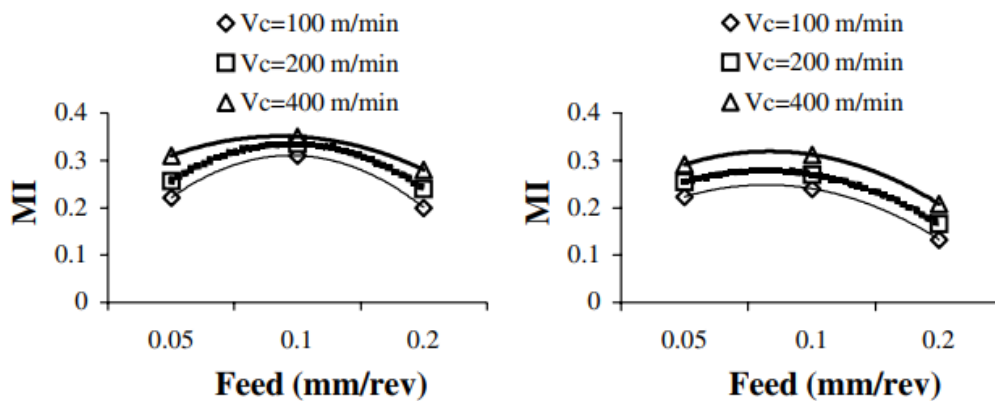
Οι Davim et al. [31] διερεύνησαν την κατεργασιμότητα των GFRPs σε τόννευση με ειδική πίεση κοπής και την επιφανειακή τραχύτητα του δοκιμίου συναρτήσει του εργαλείου κοπής (πολυκρυσταλλικό διαμάντι, PCD και καρβιδίου, K15). Δημιούργησαν έναν νέο δείκτη μηχανικής αντοχής, ο οποίος είναι συνάρτηση της πίεσης κοπής και της τραχύτητας της επιφάνειας.



Εικόνα 2.33. Επιφανειακή τραχύτητα (R_a) συναρτήσει των παραμέτρων κοπής για εργαλείο κοπής (a) PCD, (b) K15 [32]



Εικόνα 2.34. Ειδική πίεση κοπής (K_s) συναρτήσει των παραμέτρων κοπής για εργαλείο κοπής (a) PCD, (b) K15 [32]

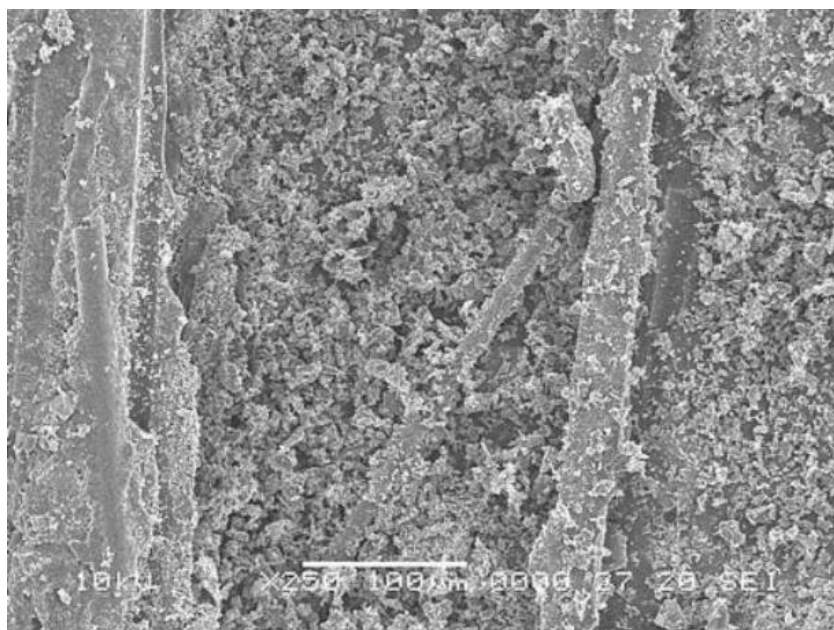


Εικόνα 2.35. Δείκτης μηχανικής κατεργασίας συναρτήσει των παραμέτρων κοπής για εργαλείο κοπής (a) PCD, (b) K15 [32]

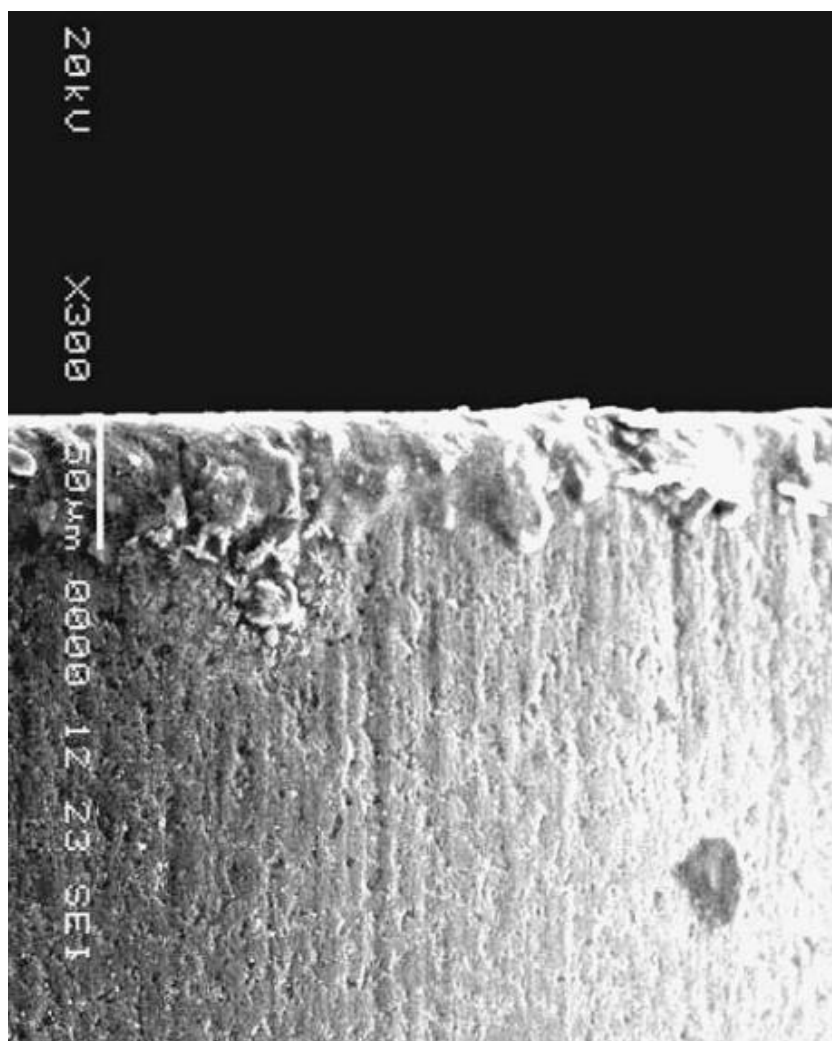
Η έρευνα αυτή βοήθησε στην κατανόηση των παραμέτρων της μηχανικής κατεργασίας και οδήγησε στα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Το εργαλείο πολυκρυσταλλικού διαμαντιού (PCD) παρουσιάζει μικρότερες τιμές τόσο για την τραχύτητα της επιφάνειας όσο και για την ειδική πίεση κοπής από το εργαλείο καρβιδίου (K15)
- Ο ρυθμός πρόωσης είναι η παράμετρος κοπής που έχει την υψηλότερη φυσική και στατιστική επίδραση στην τραχύτητα της επιφάνειας (R_a) και στην ειδική πίεση κοπής (K_s)
- Το εργαλείο πολυκρυσταλλικού διαμαντιού (PCD) παρέχει έναν καλύτερο δείκτη μηχανικής κατεργασίας (MI) σε σύγκριση με το εργαλείο σκυροδέματος (K15). Επομένως, το εργαλείο κοπής PCD έδωσε την καλύτερη συνολική απόδοση
- Έχει επιτευχθεί μέγιστος δείκτης μηχανικής κατεργασίας (MI) για βέλτιστες παραμέτρους κοπής ($V_c = 400 \text{ m/min}$, $f = 0,1 \text{ mm/rev}$).

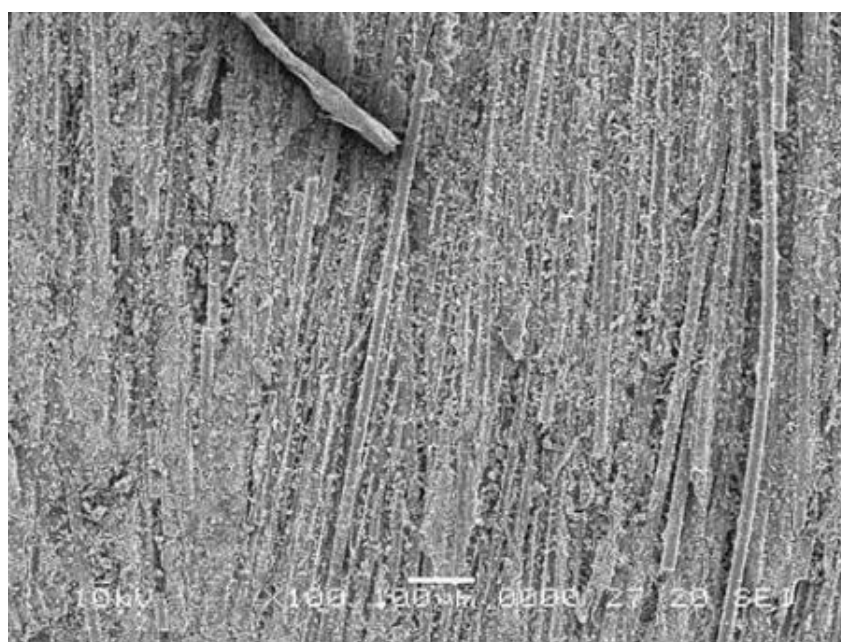
Ο Palanikumar [32] ασχολήθηκε με τη χρήση της μεθόδου Taguchi και των επιφανειών απόκρισης για την ελαχιστοποίηση της τραχύτητας της επιφάνειας των υαλονημάτων (GFRP) όταν κατεργάζονται με εργαλείο πολυκρυσταλλικού διαμαντιού (PCD). Τα πειράματα διεξήχθησαν χρησιμοποιώντας την πειραματική τεχνική σχεδιασμού του Taguchi. Οι παράμετροι κοπής που χρησιμοποίησε είναι η ταχύτητα, η πρόωση και το βάθος κοπής. Αξιολόγησε την επίδραση των παραμέτρων κοπής στην επιφανειακή τραχύτητα και προσδιόρισε τη βέλτιστη κατάσταση κοπής για την ελαχιστοποίηση της τραχύτητας της επιφάνειας. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η πιο σημαντική παράμετρος κατεργασίας για την τραχύτητα της επιφάνειας είναι η πρόωση και ακολουθεί η ταχύτητα κοπής.



Εικόνα 2.36. Μικρογραφία του ακατέργαστου δοκιμίου [33]



Εικόνα 2.37. Τυπική φθορά και ιζήματα υλικού που παρατηρήθηκαν στο εργαλείο PCD [33]



Εικόνα 2.38. Τυπικό προφίλ επιφάνειας που παρατηρείται κατά την κατεργασία των υαλονημάτων (GFRP) [33]

Πίνακας 5. Συγκεντρωτικός πίνακας της βιβλιογραφικής ανασκόπησης

Ερευνητές	Παράμετροι μελέτης	Είδος Εργαλείου	Μετρούμενα Μεγέθη
Takeyama και Iijima [16]	κατεύθυνση ινών / κατεύθυνση κοπής	συνηθισμένη μηχανική κατεργασία / μηχανική κατεργασία με υπερήχους	Δυνάμεις κοπής / ποιότητα επιφάνειας
Lee [17]	εργαλεία κοπής	μονοκρυσταλλικό διαμάντι / πολυκρυσταλλικό διαμάντι / κυβικό νιτρίδιο του βορίου	Δυνάμεις κοπής / ποιότητα επιφάνειας
Chang [18]	εργαλεία κοπής	καρβιδίου τύπου P και K	δυνάμεις κοπής / θερμοκρασία κοπής
Gupta και Kumar [19]	ταχύτητα κοπής, ταχύτητα πρόωσης, βάθος κοπής / στεγνό, υγρό, ψυχόμενο περιβάλλον	πολυκρυσταλλικό εργαλείο διαμαντιού διαφορετικής γωνίας κλίσης και διαμέτρου μύτης	τραχύτητα επιφάνειας / ρυθμός αποβολής υλικού
Vasudevan et al. [20]	ακτίνα εργαλείου / ταχύτητα κοπής / ταχύτητα πρόωσης / βάθος κοπής	ένθετο καρβιδίου εξαιρετικής ποιότητας / τρεις διαφορετικοί τύποι ένθετων με ISO CNMG 120404, CNMG 120408 και CNMG 120412	επιφανειακή τραχύτητα
Parida et al. [21], [22]	ταχύτητα άξονα / πρόωση / διάμετρος του τρυπανιού		επιφανειακή τραχύτητα
Sivasankaran et al. [23]	ρυθμός πρόωσης / βάθος κοπής / ταχύτητα κοπής		επιφανειακή τραχύτητα
Vasudevan et al. [24]	ακτίνα της μύτης του εργαλείου / ταχύτητα κοπής / ρυθμός πρόωσης / βάθος κοπής	πολυκρυσταλλικό διαμάντι (PCD)	επιφανειακή τραχύτητα / εφαπτομένη δύναμη κοπής / ρυθμός αποβολής υλικού
Sharma et al. [25]	ταχύτητα κοπής / ταχύτητα πρόωσης / βάθος κοπής		επιφανειακή τραχύτητα / ρυθμός αποβολής υλικού / φθορά εργαλείων
Vijaya Kini et al. [26]	ρυθμός πρόωσης / βάθος κοπής / ρυθμός αποβολής υλικού		επιφανειακή τραχύτητα / ρυθμός αποβολής υλικού
Palanikumar [27]	ταχύτητα κοπής / γωνία προσανατολισμού των ινών / βάθος κοπής / ρυθμός πρόωσης		επιφανειακή τραχύτητα
Nayak et al. [29]	Προσανατολισμός ινών / Βάθος κοπής	συνδυασμός εργαλείων HSS και εργαλείων καρβιδίου	σχηματισμός αποβλίπτου / δυνάμεις κοπής / βλάβη υπο-επιφανειών.
Rao et al. [30]	προσανατολισμός ινών / παραμέτρων εργαλείου		αστοχία ίνας – μήτρας / μέγεθος του αποβλίπτου.
Davim et al. [31]	ταχύτητα κοπής / ταχύτητα πρόωσης	πολυκρυσταλλικό διαμάντι, PCD και καρβιδίου, K15	επιφανειακή τραχύτητα / Ειδική πίεση κοπής / Δείκτης μηχανικής κατεργασίας
Palanikumar [32]	ταχύτητα κοπής / ταχύτητα πρόωσης / βάθος κοπής	πολυκρυσταλλικό διαμάντι	επιφανειακή τραχύτητα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

3.1. Σκοπός του πειράματος

Είναι γνωστό ότι η κατεργασία της τórνευσης αλλάζει τη γεωμετρία και τον ρυθμό αποβολής του υλικού και ότι η αλλαγή αυτή συνεπάγεται τη διακύμανση των δυνάμεων της κοπής. Διαισθητικά, αλλά και ανατρέχοντας στα αποτελέσματα άλλων πειραμάτων που έχουν διεξαχθεί (για διαφορετικούς δε συνδυασμούς υλικών εργαλείου-τεμαχίου), αναμένεται ότι υπάρχει συσχέτιση-έστω και χαλαρή- ανάμεσα στην τιμή των δυνάμεων κοπής και την ποιότητα της επιφάνειας σε κάθε σημείο της κατεργασίας.

Θα ήταν χρήσιμο να μπορεί να διαπιστωθεί εάν αυτή η συσχέτιση είναι αφενός υπαρκτή και αφετέρου αρκετά ισχυρή ώστε να μπορεί να αξιοποιηθεί αργότερα για επιτόπια εκτίμηση της ποιότητας της επιφάνειας σε συνθήκες παραγωγής. Αυτός ακριβώς είναι και ο σκοπός αυτής της εργασίας: να διαπιστωθεί εάν προβλέπεται η δυνατότητα να παρατηρηθεί εμμέσως- αλλά αξιόπιστα- η ποιότητα της επιφάνειας κατά την τórνευση σε μέσες και υψηλές ταχύτητες κοπής, μέσω των μετρούμενων δυνάμεων που δέχεται το κοπτικό εργαλείο.

3.2. Η πειραματική διάταξη

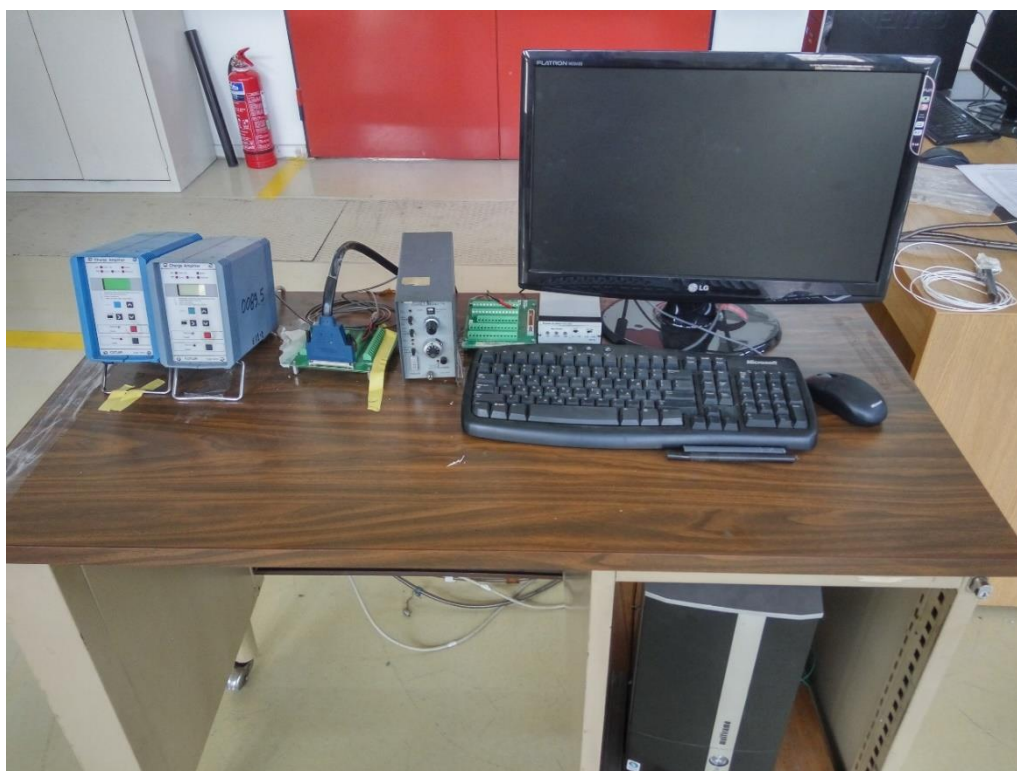
Η πειραματική διάταξη περιλαμβάνει τα εξής:

- Τόρνος: HAAS TL-1 (βλ. Εικόνα 3.1)
- Δυναμόμετρο: KIAG SWISS 9257A (βλ. Εικόνα 3.3)
- Μετρητική κάρτα: National Instruments 1830300-01L (βλ. Εικόνα 3.2)
- Ενισχυτές: 2x Kistler 5011, 1x Kistler 5006 (βλ. Εικόνα 3.2)
- Λογισμικό: LabView, ImageJ
- Δοκίμιο (βλ. Εικόνα 3.4)

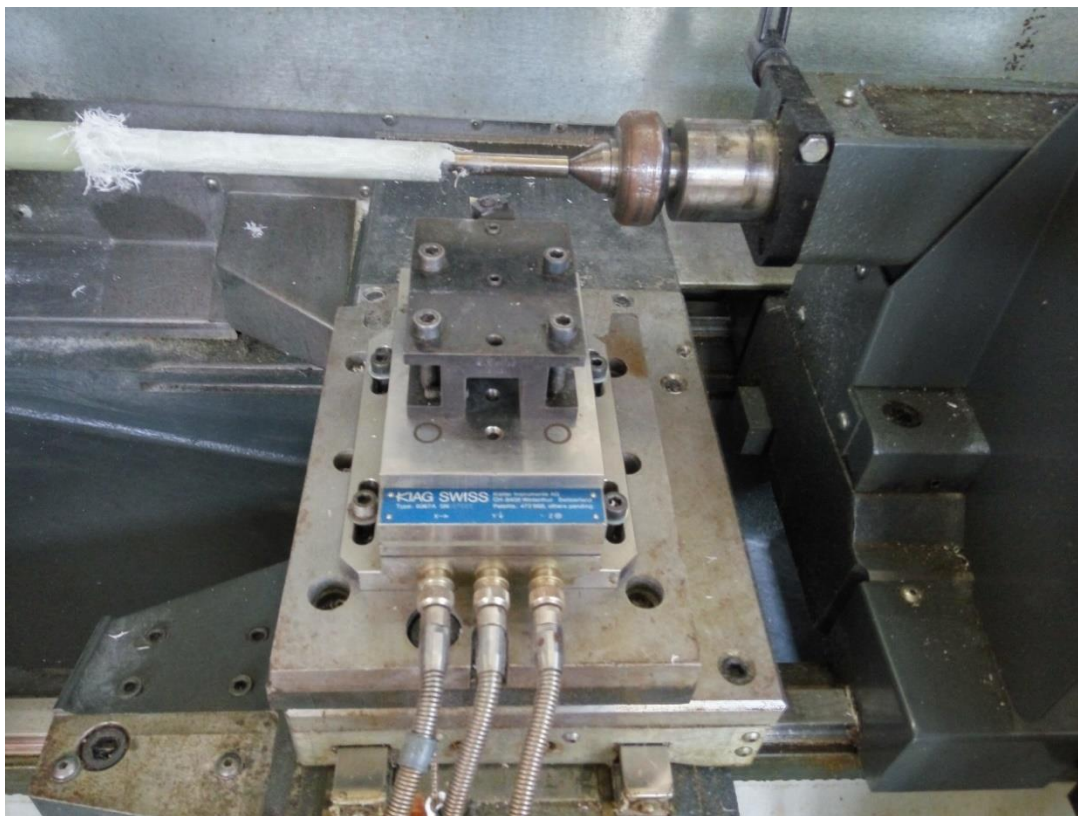
Ακολουθούν φωτογραφίες του πειραματικού εξοπλισμού:



Εικόνα 3.1. Ο τόρνος HAAS



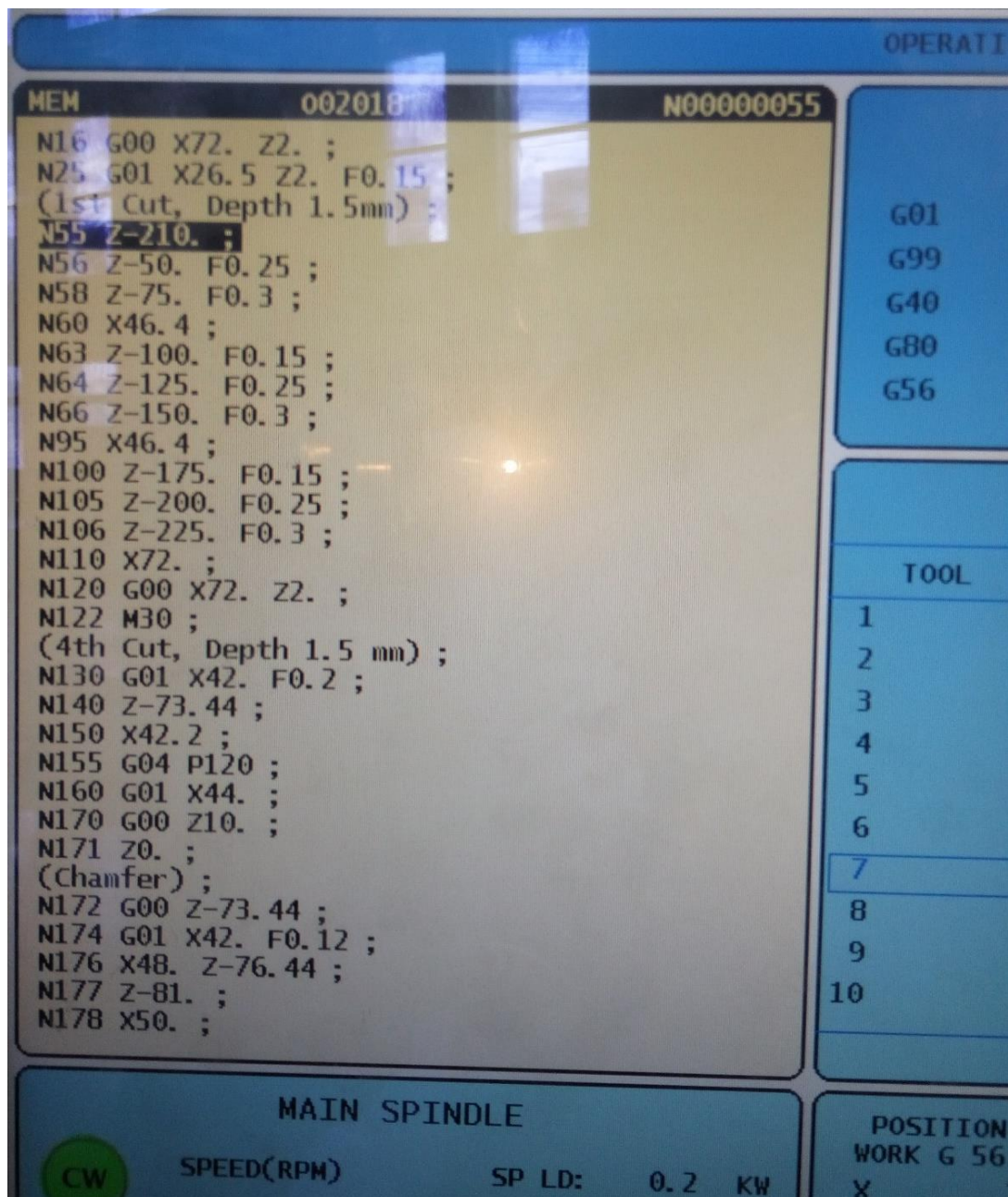
Εικόνα 3.2. Ο υπολογιστής συνδεδεμένος με τη μετρητική κάρτα και τους ενισχυτές



Εικόνα 3.3. Το δυναμόμετρο KIAG SWISS



Εικόνα 3.4. Το δοκίμιο πριν την τórνευση



Εικόνα 3.5. Ο προγραμματισμός του CNC τόρνου



Εικόνα 3.6. Το κοπτικό Εργαλείο



Εικόνα 3.7. Το δοκίμιο προσαρμοσμένο στον τόρνο κατά την πρώτη τórνευση

3.3. Διεξαγωγή του πειράματος

Κατεργάστηκε κυλινδρική ράβδος υαλονήματος (fiberglass) με γωνία ινών 90° σε HAAS TL-1 CNC τόρνο με 3 μεταβλητές: τη πρόωση, το βάθος κοπής και τη ταχύτητα κοπής. Η κατεργασία έγινε με προγραμματισμό του τόρνου για ένα πέρασμα και αλλάζοντας τις παραμέτρους και δημιουργώντας πειράματα ανά συγκεκριμένη απόσταση στο δοκίμιο σύμφωνα με τον άξονά του. Τα διαφορετικά πειράματα που πραγματοποιήθηκαν ήταν 9, με διαφορετικές τιμές παραμέτρων το καθένα, οι οποίες προέκυψαν ύστερα από DOE (Design Of Experiment) ανάλυση Taguchi. Οι τιμές ανά πείραμα φαίνονται στο παρακάτω πίνακα:

Taguchi Orthogonal Array Design			
Αριθμός Πειράματος	Πρόωση (mm/rev)	Βάθος Κοπής (mm)	Ταχύτητα Κοπής (m/min)
3	0,1	1,2	150
6	0,3	1,2	50
9	0,5	1,2	100
2	0,1	0,8	100
5	0,3	0,8	150
8	0,5	0,8	50
1	0,1	0,4	50
4	0,3	0,4	100
7	0,5	0,4	150

Πίνακας 6. Πειράματα που πραγματοποιήθηκαν έπειτα από την DOE ανάλυση Taguchi

Σε κάθε πείραμα μετρήθηκαν οι δυνάμεις κοπής κατά τους τρεις άξονες F_x , F_y και F_z και έγινε ανάλυσή τους μέσω ανάλυσης παλινδρόμησης και ανάλυσης του signal-to-noise ratio. Επίσης σε κάθε πείραμα πάρθηκε φωτογραφία των αποβλίττων και σε όσα πειράματα το επέτρεπαν έγινε συλλογή αποβλίττου.

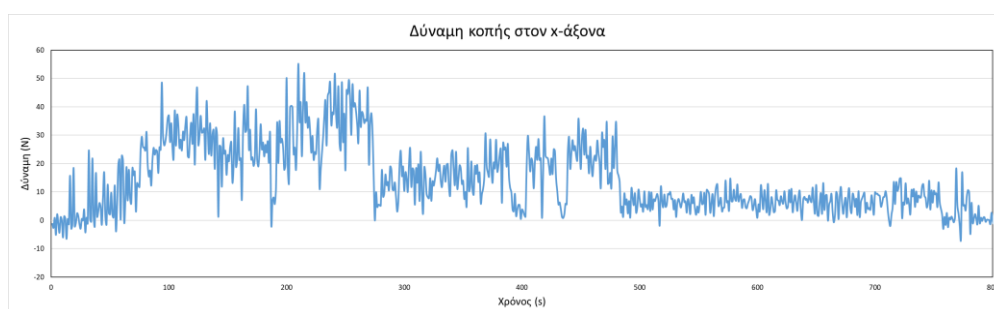
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

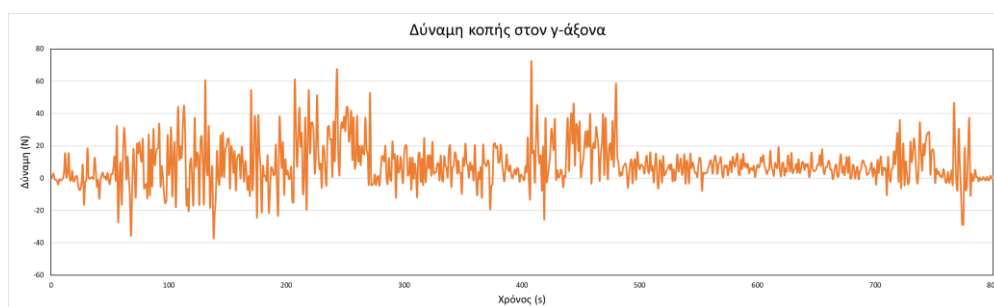
Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία μελετήθηκαν οι τρεις δυνάμεις κοπής στους τρεις άξονες συντεταγμένων, οι F_x , F_y και F_z . Οι παράμετροι που επηρεάζουν αυτές τις δυνάμεις είναι η πρόωση, το βάθος κοπής και η ταχύτητα κοπής. Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν αναλύθηκαν με απώτερο σκοπό την εύρεση της επίδρασης κάθε μιας μεταβλητής στην τιμή των δυνάμεων.

4.1 Πειραματικά αποτελέσματα των δυνάμεων κοπής

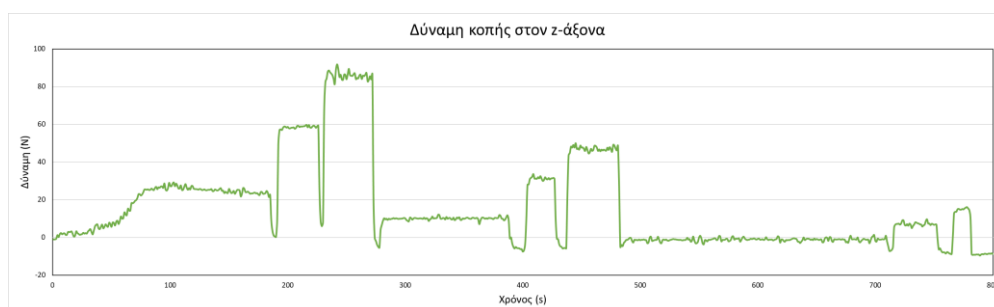
Στις επόμενες Εικόνες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που λήφθηκαν με το λογισμικό Labview, το οποίο χρησιμοποιείται για να παίρνει τις μετρήσεις που στέλνει το δυναμόμετρο στον Η/Υ, και επεξεργάστηκαν με το πρόγραμμα Microsoft Excel.



Εικόνα 4.1. Δύναμη κοπής στον x-άξονα συναρτήσει του χρόνου



Εικόνα 4.2. Δύναμη κοπής στον y-άξονα συναρτήσει του χρόνου



Εικόνα 4.3. Δύναμη κοπής στον z-άξονα συναρτήσει του χρόνου

4.2 Στατιστική ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων

Τα πειραματικά αποτελέσματα αναλύθηκαν στατιστικά με τη βοήθεια του προγράμματος Minitab και βρέθηκε η εξάρτηση των μέσων δυνάμεων από τις παραμέτρους του πειράματος. Το πρόγραμμα Minitab αναλύει τη διακύμανση των τιμών των παραμέτρων και βάσει στατιστικών αποτελεσμάτων βρίσκει την αλληλεξάρτησή τους. Οι τιμές των παραμέτρων που πρόκειται να αναλυθούν και οι μέσες τιμές των δυνάμεων στους τρεις άξονες για την κάθε περίπτωση τοποθετούνται στο φύλλο εργασίας του Minitab, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.4.

Στη συγκεκριμένη εργασία πραγματοποιήθηκε ανάλυση παλινδρόμησης (regression analysis), η οποία εξετάζει τη σχέση ανάμεσα στις ανεξάρτητες και τις εξαρτημένες μεταβλητές. Ως ανεξάρτητες μεταβλητές (continuous predictors) έχουν ορισθεί το βάθος κοπής, η ταχύτητα κοπής και η πρόωση και ως εξαρτημένη μεταβλητή (response) η μέση δύναμη. Για να υπάρχει καλή συσχέτιση θα πρέπει οι τιμές R-sq, R-sq(adj) και R-sq(pred) να είναι όσο πιο κοντά γίνεται στο 100%. Αναλύθηκαν τα αποτελέσματα με το απλό μοντέλο παλινδρόμησης, και με μοντέλα που περιέχουν επιπλέον όρους.

4.2.1 Αποτελέσματα της ανάλυσης παλινδρόμησης για το απλό μοντέλο

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης παλινδρόμησης για το απλό μοντέλο.

Worksheet 3 ***							
↓	C1	C2	C3	C4 ✓	C5 ✓	C6 ✓	C7
	Πρόωση (mm/rev)	Βάθος Κοπής(mm)	Ταχύτητα Κοπής(m/min)	Fz	Fx	Fy	
1	0,1	0,4	50	1,1120	6,5754	6,6979	
2	0,1	0,8	100	10,0875	15,7730	7,0090	
3	0,1	1,2	150	25,0070	27,5000	7,9013	
4	0,3	0,4	100	6,9222	8,0303	11,8170	
5	0,3	0,8	150	30,4380	20,5060	13,9019	
6	0,3	1,2	50	58,6562	31,3730	15,8021	
7	0,5	0,4	150	14,7768	4,7784	7,3543	
8	0,5	0,8	50	46,6107	22,7580	20,1950	
9	0,5	1,2	100	83,9700	37,3460	21,9933	
10							

Εικόνα 4.4. Οι τιμές των παραμέτρων που πρόκειται να αναλυθούν και οι μέσες τιμές των δυνάμεων στους τρεις άξονες, στο φύλλο εργασίας του Minitab

Από τα αποτελέσματα είναι εμφανές πως καλή συσχέτιση εμφανίζεται για τη δύναμη στον x- άξονα και για τη δύναμη στον z- άξονα. Από τη συνάρτηση της δύναμης Fx συμπεραίνουμε πως εξαρτάται κυρίως από το βάθος κοπής, ακολουθεί η

πρόωση και εξαρτάται λιγότερο από την ταχύτητα κοπής. Η δύναμη F_z εξαρτάται κυρίως από την πρόωση, ακολουθεί το βάθος κοπής και τέλος η ταχύτητα κοπής. Η παλινδρομική ανάλυση δεν έδωσε καλή συσχέτιση για την F_y , άρα δεν μπορούν να βγουν ασφαλή συμπεράσματα για το ποια παράμετρος είναι πιο σημαντική.

Regression Analysis: F_x versus Πρόωση (mm/rev); Βάθος Κοπής(mm); Ταχύτητα Κοπής(m/min)						
Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Regression	3	1032,06	344,021	53,51	0,000	
Πρόωση (mm/rev)	1	37,67	37,670	5,86	0,060	
Βάθος Κοπής (mm)	1	983,93	983,934	153,05	0,000	
Ταχύτητα Κοπής (m/min)	1	10,46	10,460	1,63	0,258	
Error	5	32,14	6,429			
Total	8	1064,21				
Model Summary						
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)			
2,53551	96,98%	95,17%	87,82%			
Coefficients						
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF	
Constant	-7,33	3,42	-2,14	0,085		
Πρόωση (mm/rev)	12,53	5,18	2,42	0,060	1,00	
Βάθος Κοπής (mm)	32,01	2,59	12,37	0,000	1,00	
Ταχύτητα Κοπής (m/min)	-0,0264	0,0207	-1,28	0,258	1,00	
Regression Equation						
$F_x = -7,33 + 12,53 \text{ Πρόωση (mm/rev)} + 32,01 \text{ Βάθος Κοπής (mm)} - 0,0264 \text{ Ταχύτητα Κοπής (m/min)}$						

Εικόνα 4.5. Αποτελέσματα της ανάλυσης παλινδρόμησης της δύναμης στον x-άξονα, για το απλό μοντέλο

Regression Analysis: F_y versus Πρόωση (mm/rev); Βάθος Κοπής(mm); Ταχύτητα Κοπής(m/min)						
Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Regression	3	226,12	75,374	7,85	0,024	
Πρόωση (mm/rev)	1	130,06	130,056	13,55	0,014	
Βάθος Κοπής (mm)	1	65,52	65,521	6,83	0,048	
Ταχύτητα Κοπής (m/min)	1	30,54	30,544	3,18	0,135	
Error	5	47,99	9,598			
Total	8	274,11				
Model Summary						
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)			
3,09803	82,49%	71,99%	29,69%			
Coefficients						
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF	
Constant	3,44	4,18	0,82	0,448		
Πρόωση (mm/rev)	23,28	6,32	3,68	0,014	1,00	
Βάθος Κοπής (mm)	8,26	3,16	2,61	0,048	1,00	
Ταχύτητα Κοπής (m/min)	-0,0451	0,0253	-1,78	0,135	1,00	
Regression Equation						
$F_y = 3,44 + 23,28 \text{ Πρόωση (mm/rev)} + 8,26 \text{ Βάθος Κοπής (mm)} - 0,0451 \text{ Ταχύτητα Κοπής (m/min)}$						

Εικόνα 4.6. Αποτελέσματα της ανάλυσης παλινδρόμησης της δύναμης στον y-άξονα, για το απλό μοντέλο

Regression Analysis: Fz versus Πρόωση (mm/rev); Βάθος Κοπής(mm); Ταχύτητα Κοπής(m/min)						
Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Regression	3	5699,1	1899,71	29,24	0,001	
Πρόωση (mm/rev)	1	1985,7	1985,66	30,57	0,003	
Βάθος Κοπής (mm)	1	3495,6	3495,58	53,81	0,001	
Ταχύτητα Κοπής (m/min)	1	217,9	217,89	3,35	0,127	
Error	5	324,8	64,96			
Total	8	6023,9				
Model Summary						
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)			
8,06004	94,61%	91,37%	78,16%			
Coefficients						
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF	
Constant	-32,7	10,9	-3,00	0,030		
Πρόωση (mm/rev)	91,0	16,5	5,53	0,003	1,00	
Βάθος Κοπής (mm)	60,34	8,23	7,34	0,001	1,00	
Ταχύτητα Κοπής (m/min)	-0,1205	0,0658	-1,83	0,127	1,00	
Regression Equation						
Fz = -32,7 + 91,0 Πρόωση (mm/rev) + 60,34 Βάθος Κοπής (mm) - 0,1205 Ταχύτητα Κοπής (m/min)						

Εικόνα 4.7. Αποτελέσματα της ανάλυσης παλινδρόμησης της δύναμης στον z-άξονα, για το απλό μοντέλο

4.2.2 Αποτελέσματα της ανάλυσης παλινδρόμησης για το μοντέλο με τους επιπλέον όρους των τετραγώνων των παραμέτρων

Επειδή η ανάλυση παλινδρόμησης δεν έδωσε την απαραίτητη συσχέτιση για όλες τις δυνάμεις, κρίθηκε απαραίτητη η εισαγωγή επιπλέον όρων στο μοντέλο. Συγκεκριμένα, εισήχθησαν στη πρώτη περίπτωση τα τετράγωνα των παραμέτρων και στη δεύτερη περίπτωση το γινόμενο των τριών παραμέτρων, δηλαδή πρόωση × βάθος κοπής × ταχύτητα κοπής, ώστε να βρεθεί με ποιους συνδυασμούς θα βγει μεγαλύτερη η συσχέτιση. Το φύλλο εργασίας του Minitab για αυτή την περίπτωση παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.24 και τα αποτελέσματα της ανάλυσης για τις τρεις δυνάμεις στις Εικόνες που ακολουθούν.

Απαραίτητη συσχέτιση και με την προσθήκη των όρων των τετραγώνων των τιμών των παραμέτρων παρατηρήθηκε μόνο για τη δύναμη F_x, η οποία βρέθηκε και σε αυτή την περίπτωση να εξαρτάται κυρίως από το βάθος κοπής.

Worksheet 1 ***										
↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
	Πρώωση (mm/rev)	Βάθος Κοπής(mm)	Ταχύτητα Κοπής(m/min)				Fz	Fx	Fy	
1	0,1	0,4	50	0,01	0,16	2500	1,1120	6,5754	6,6979	
2	0,1	0,8	100	0,01	0,64	10000	10,0875	15,7730	7,0090	
3	0,1	1,2	150	0,01	1,44	22500	25,0070	27,5000	7,9013	
4	0,3	0,4	100	0,09	0,16	10000	6,9222	8,0303	11,8170	
5	0,3	0,8	150	0,09	0,64	22500	30,4380	20,5060	13,9019	
6	0,3	1,2	50	0,09	1,44	2500	58,6562	31,3730	15,8021	
7	0,5	0,4	150	0,25	0,16	22500	14,7768	4,7784	7,3543	
8	0,5	0,8	50	0,25	0,64	2500	46,6107	22,7580	20,1950	
9	0,5	1,2	100	0,25	1,44	10000	83,9700	37,3460	21,9933	
10										

Εικόνα 4.8. Οι τιμές των παραμέτρων, τα τετράγωνα των τιμών τους ως επιπλέον όροι και οι μέγιστες τιμές των δυνάμεων στους τρεις άξονες, στο φύλλο εργασίας του Minitab

Regression Analysis: Fx versus Γωνία Κοπής; Βάθος Κοπής(mm); Ταχύτητα Κοπής(m; C4; C5; C6

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	6	1038,15	173,025	13,28	0,072
Γωνία Κοπής	1	5,46	5,464	0,42	0,584
Βάθος Κοπής(mm)	1	25,58	25,579	1,96	0,296
Ταχύτητα Κοπής(m/min)	1	2,54	2,537	0,19	0,702
C4	1	1,44	1,438	0,11	0,771
C5	1	0,34	0,339	0,03	0,887
C6	1	4,31	4,310	0,33	0,623
Error	2	26,06	13,028		
Total	8	1064,21			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
3,60950	97,55%	90,21%	50,42%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-14,9	13,6	-1,10	0,387	
Γωνία Κοπής	25,2	39,0	0,65	0,584	28,00
Βάθος Κοπής(mm)	36,1	25,8	1,40	0,296	49,00
Ταχύτητα Κοπής(m/min)	0,091	0,206	0,44	0,702	49,00
C4	-21,2	63,8	-0,33	0,771	28,00
C5	-2,6	16,0	-0,16	0,887	49,00
C6	-0,00059	0,00102	-0,58	0,623	49,00

Regression Equation

Fx = -14,9 + 25,2 Γωνία Κοπής + 36,1 Βάθος Κοπής(mm) + 0,091 Ταχύτητα Κοπής(m/min) - 21,2 C4 - 2,6 C5 - 0,00059 C6

Εικόνα 4.9. Αποτελέσματα της ανάλυσης παλινδρόμησης της δύναμης στον x-άξονα, για το μοντέλο με επιπλέον όρους τα τετράγωνα των τιμών των τριών παραμέτρων

Regression Analysis: Fy versus Πρόωση (mm/rev); Βάθος Κοπής(mm); Ταχύτητα Κοπής(m; C4; C5; C6						
Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Regression	6	245,594	40,932	2,87	0,281	
Πρόωση (mm/rev)	1	24,083	24,083	1,69	0,323	
Βάθος Κοπής(mm)	1	13,249	13,249	0,93	0,437	
Ταχύτητα Κοπής(m/min)	1	2,230	2,230	0,16	0,731	
C4	1	7,856	7,856	0,55	0,535	
C5	1	6,297	6,297	0,44	0,575	
C6	1	5,320	5,320	0,37	0,603	
Error	2	28,516	14,258			
Total	8	274,111				
Model Summary						
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)			
3,77600	89,60%	58,39%	0,00%			
Coefficients						
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF	
Constant	-11,1	14,2	-0,78	0,518		
Πρόωση (mm/rev)	53,0	40,8	1,30	0,323	28,00	
Βάθος Κοπής(mm)	26,0	27,0	0,96	0,437	49,00	
Ταχύτητα Κοπής(m/min)	0,085	0,216	0,40	0,731	49,00	
C4	-49,5	66,8	-0,74	0,535	28,00	
C5	-11,1	16,7	-0,66	0,575	49,00	
C6	-0,00065	0,00107	-0,61	0,603	49,00	
Regression Equation						
Fy = -11,1 + 53,0 Πρόωση (mm/rev) + 26,0 Βάθος Κοπής(mm) + 0,085 Ταχύτητα Κοπής(m/min) - 49,5 C4 - 11,1 C5 - 0,00065 C6						

Εικόνα 4.10. Αποτελέσματα της ανάλυσης παλινδρόμησης της δύναμης στον γ-άξονα, για το μοντέλο με επιπλέον όρους τα τετράγωνα των τιμών των τριών παραμέτρων

Regression Analysis: Fz versus Γωνία Κοπής; Βάθος Κοπής(mm); Ταχύτητα Κοπής(m; C4; C5; C6

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	6	5755,47	959,245	7,15	0,128
Γωνία Κοπής	1	117,60	117,597	0,88	0,448
Βάθος Κοπής(mm)	1	21,84	21,842	0,16	0,726
Ταχύτητα Κοπής(m/min)	1	14,49	14,494	0,11	0,774
C4	1	6,09	6,089	0,05	0,851
C5	1	14,53	14,529	0,11	0,773
C6	1	35,73	35,726	0,27	0,657
Error	2	268,48	134,239		
Total	8	6023,94			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
11,5861	95,54%	82,17%	9,75%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-40,5	43,6	-0,93	0,451	
Γωνία Κοπής	117	125	0,94	0,448	28,00
Βάθος Κοπής(mm)	33,4	82,8	0,40	0,726	49,00
Ταχύτητα Κοπής(m/min)	0,218	0,662	0,33	0,774	49,00
C4	-44	205	-0,21	0,851	28,00
C5	16,8	51,2	0,33	0,773	49,00
C6	-0,00169	0,00328	-0,52	0,657	49,00

Regression Equation

Fz = -40,5 + 117 Γωνία Κοπής + 33,4 Βάθος Κοπής(mm) + 0,218 Ταχύτητα Κοπής(m/min) - 44 C4 + 16,8 C5 - 0,00169 C6

Εικόνα 4.11. Αποτελέσματα της ανάλυσης παλινδρόμησης της δύναμης στον z-άξονα, για το μοντέλο με επιπλέον όρους τα τετράγωνα των τιμών των τριών παραμέτρων

4.2.3 Αποτελέσματα της ανάλυσης παλινδρόμησης για το μοντέλο με τον επιπλέον όρο του γινομένου των παραμέτρων

Επειδή και η ανάλυση με τους επιπλέον όρους των τετραγώνων δεν έδωσε καλή συσχέτιση, πραγματοποιήθηκε άλλη μια δοκιμή, προσθέτοντας ως όρους αυτή τη φορά το τριπλό γινόμενο των τιμών των παραμέτρων. Στην περίπτωση αυτή πετύχαμε ικανοποιητική συσχέτιση και στις 3 δυνάμεις. Παρακάτω παρουσιάζονται οι τιμές των επιπλέον όρων όπως εισήχθησαν στο Minitab και τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

Worksheet 1 ***								
↓	C1	C2	C3	C4	C5 <input checked="" type="checkbox"/>	C6 <input checked="" type="checkbox"/>	C7 <input checked="" type="checkbox"/>	C8
	Πρόωση (mm/rev)	Βάθος Κοπής(mm)	Ταχύτητα Κοπής(m/min)	Γινόμενα 3 όρων	Fz	Fx	Fy	
1	0,1	0,4	50	2	1,1120	6,5754	6,6979	
2	0,1	0,8	100	8	10,0875	15,7730	7,0090	
3	0,1	1,2	150	18	25,0070	27,5000	7,9013	
4	0,3	0,4	100	12	6,9222	8,0303	11,8170	
5	0,3	0,8	150	36	30,4380	20,5060	13,9019	
6	0,3	1,2	50	18	58,6562	31,3730	15,8021	
7	0,5	0,4	150	30	14,7768	4,7784	7,3543	
8	0,5	0,8	50	20	46,6107	22,7580	20,1950	
9	0,5	1,2	100	60	83,9700	37,3460	21,9933	
10								

Εικόνα 4.12. Οι τιμές των παραμέτρων, το γινόμενό τους ως επιπλέον όρος και οι μέγιστες τιμές των δυνάμεων στους τρεις άξονες, στο φύλλο εργασίας του Minitab

Regression Analysis: Fx versus Γωνία Κοπής; Βάθος Κοπής; Ταχύτητα Κοπ; Γινόμενα 3 ό						
Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Regression	4	1051,07	262,767	80,00	0,000	
Γωνία Κοπής	1	0,01	0,008	0,00	0,964	
Βάθος Κοπής(mm)	1	407,87	407,873	124,18	0,000	
Ταχύτητα Κοπής(m/min)	1	27,31	27,315	8,32	0,045	
Γινόμενα 3 όρων	1	19,01	19,006	5,79	0,074	
Error	4	13,14	3,285			
Total	8	1064,21				
Model Summary						
	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)		
	1,81235	98,77%	97,53%	93,35%		
Coefficients						
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF	
Constant	-1,72	3,38	-0,51	0,638		
Γωνία Κοπής	-0,32	6,50	-0,05	0,964	3,08	
Βάθος Κοπής(mm)	27,94	2,51	11,14	0,000	1,84	
Ταχύτητα Κοπής(m/min)	-0,0540	0,0187	-2,88	0,045	1,60	
Γινόμενα 3 όρων	0,1880	0,0781	2,41	0,074	4,52	
Regression Equation						
Fx = -1,72 - 0,32 Γωνία Κοπής + 27,94 Βάθος Κοπής(mm) - 0,0540 Ταχύτητα Κοπής(m/min) + 0,1880 Γινόμενα 3 όρων						

Εικόνα 4.13. Αποτελέσματα της ανάλυσης παλινδρόμησης της δύναμης στον x-άξονα, για το μοντέλο με επιπλέον όρο το γινόμενο των τριών παραμέτρων

Regression Analysis: Fy versus Γωνία Κοπής; Βάθος Κοπής; Ταχύτητα Κοπ; Γινόμενα 3 ό						
Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Regression	4	236,38	59,096	6,27	0,052	
Γωνία Κοπής	1	14,91	14,914	1,58	0,277	
Βάθος Κοπής(mm)	1	14,50	14,504	1,54	0,283	
Ταχύτητα Κοπής(m/min)	1	40,08	40,081	4,25	0,108	
Γινόμενα 3 όρων	1	10,26	10,261	1,09	0,356	
Error	4	37,73	9,432			
Total	8	274,11				
Model Summary						
	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)		
	3,07114	86,24%	72,47%	17,31%		
Coefficients						
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF	
Constant	7,56	5,72	1,32	0,257		
Γωνία Κοπής	13,8	11,0	1,26	0,277	3,08	
Βάθος Κοπής(mm)	5,27	4,25	1,24	0,283	1,84	
Ταχύτητα Κοπής(m/min)	-0,0654	0,0317	-2,06	0,108	1,60	
Γινόμενα 3 όρων	0,138	0,132	1,04	0,356	4,52	
Regression Equation						
Fy = 7,56 + 13,8 Γωνία Κοπής + 5,27 Βάθος Κοπής(mm) - 0,0654 Ταχύτητα Κοπής(m/min) + 0,138 Γινόμενα 3 όρων						

Εικόνα 4.14. Αποτελέσματα της ανάλυσης παλινδρόμησης της δύναμης στον y-άξονα, για το μοντέλο με επιπλέον όρο το γινόμενο των τριών παραμέτρων

Regression Analysis: Fz versus Γωνία Κοπής; Βάθος Κοπής; Ταχύτητα Κοπ; Γινόμενα 3 ό

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	4	6008,37	1502,09	385,66	0,000
Γωνία Κοπής	1	119,33	119,33	30,64	0,005
Βάθος Κοπής (mm)	1	1007,50	1007,50	258,68	0,000
Ταχύτητα Κοπής (m/min)	1	503,46	503,46	129,26	0,000
Γινόμενα 3 όρων	1	309,24	309,24	79,40	0,001
Error	4	15,58	3,89		
Total	8	6023,94			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1,97353	99,74%	99,48%	98,79%

Coefficients

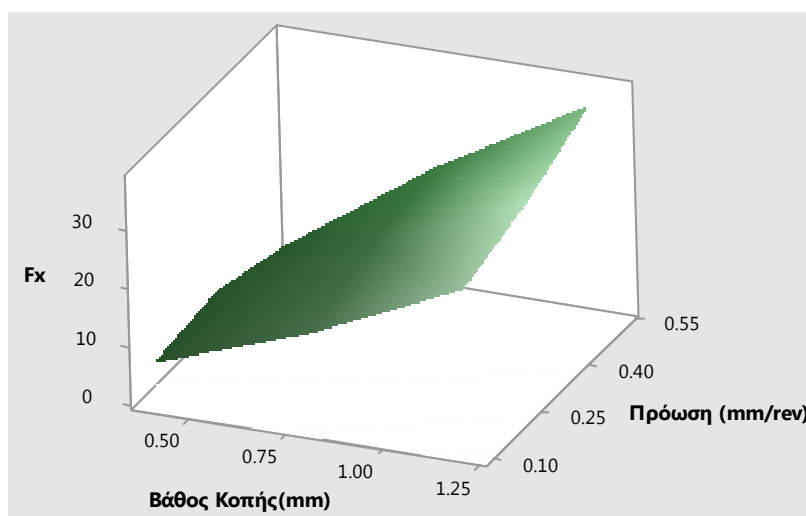
Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-10,05	3,68	-2,73	0,052	
Γωνία Κοπής	39,15	7,07	5,54	0,005	3,08
Βάθος Κοπής (mm)	43,92	2,73	16,08	0,000	1,84
Ταχύτητα Κοπής (m/min)	-0,2317	0,0204	-11,37	0,000	1,60
Γινόμενα 3 όρων	0,7582	0,0851	8,91	0,001	4,52

Regression Equation

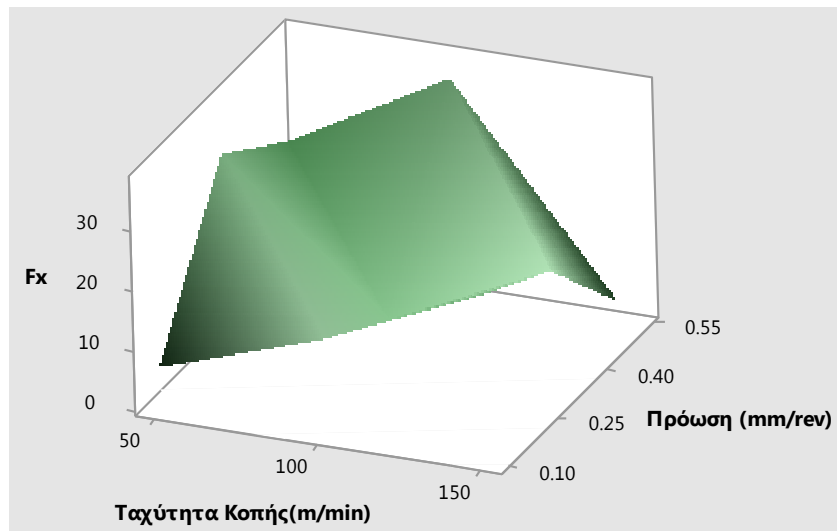
Fz = -10,05 + 39,15 Γωνία Κοπής + 43,92 Βάθος Κοπής (mm) - 0,2317 Ταχύτητα Κοπής (m/min) + 0,7582 Γινόμενα 3 όρων

Εικόνα 4.15. Αποτελέσματα της ανάλυσης παλινδρόμησης της δύναμης στον z-άξονα, για το μοντέλο με επιπλέον όρο το γινόμενο των τριών παραμέτρων

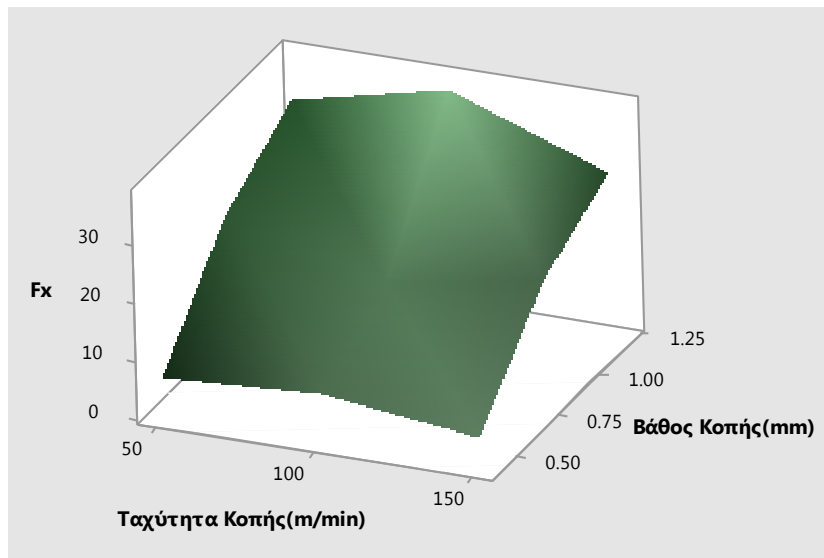
Η ανάλυση αυτή, με την προσθήκη του επιπλέον όρου, δίνει πολύ καλή συσχέτιση για την δύναμη Fx και για την δύναμη Fz. Παρατηρείται πως η παράμετρος που επηρεάζει περισσότερο τη δύναμη Fz είναι η ίδια παράμετρος που επηρεάζει και τη δύναμη Fx, δηλαδή το βάθος κοπής και ακολουθούν κατά σειρά η πρόωση και η ταχύτητα κοπής. Και για τη δύναμη Fy η κυριότερη είναι η πρόωση και μετά κατά σειρά το βάθος κοπής και η ταχύτητα κοπής. Παρακάτω ακολουθούν τα διαγράμματα που συσχετίζουν τη δύναμη κοπής στους 3 άξονες με τις τρεις παραμέτρους που μελετήθηκαν.



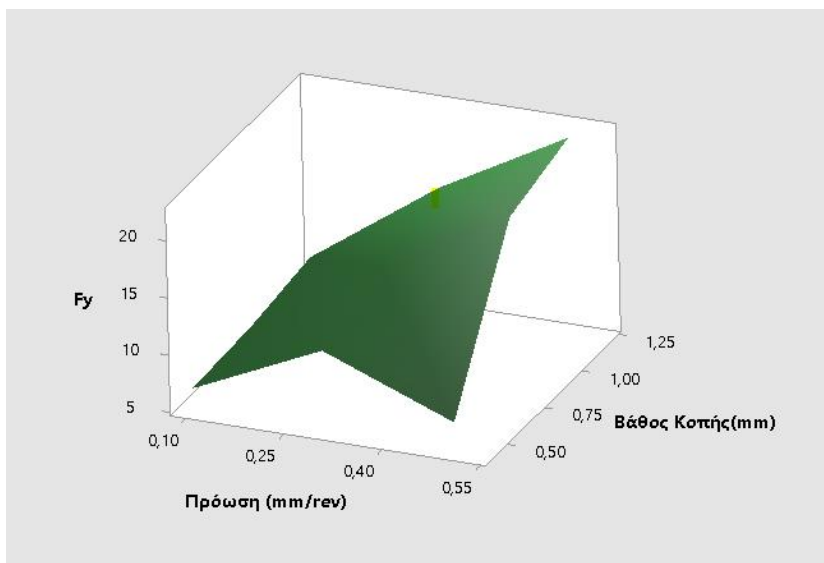
Εικόνα 4.16. Δύναμη στον x- άξονα συναρτήσει της πρόωσης και του βάθους κοπής



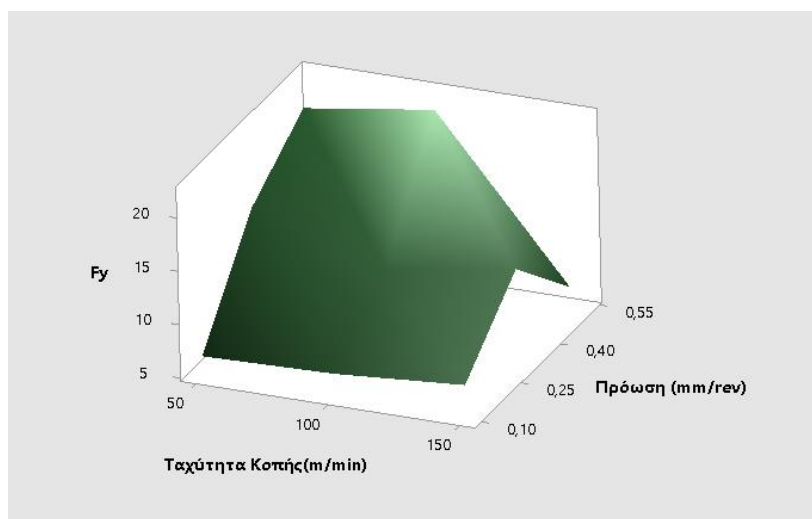
Εικόνα 4.17. Δύναμη στον x- άξονα συναρτήσει της πρόωσης και της ταχύτητας κοπής



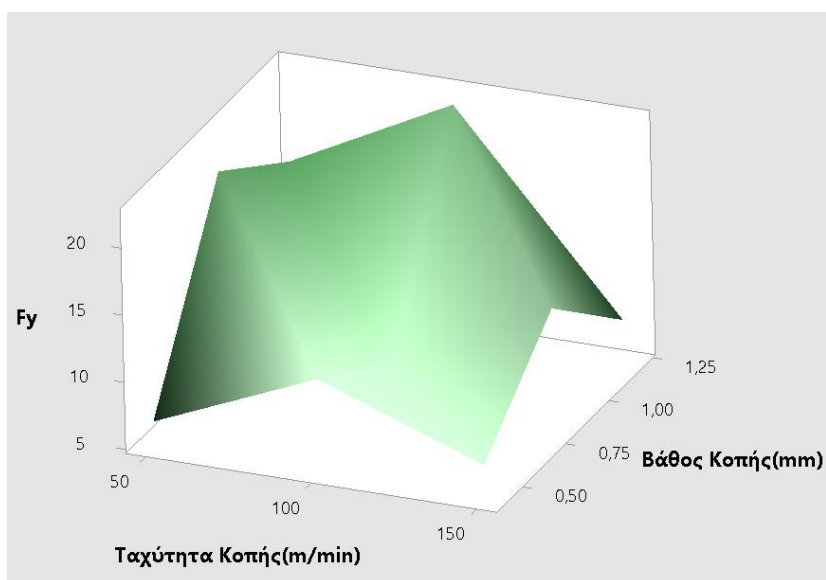
Εικόνα 4.18. Δύναμη στον x- άξονα συναρτήσει της ταχύτητας κοπής και του βάθους κοπής



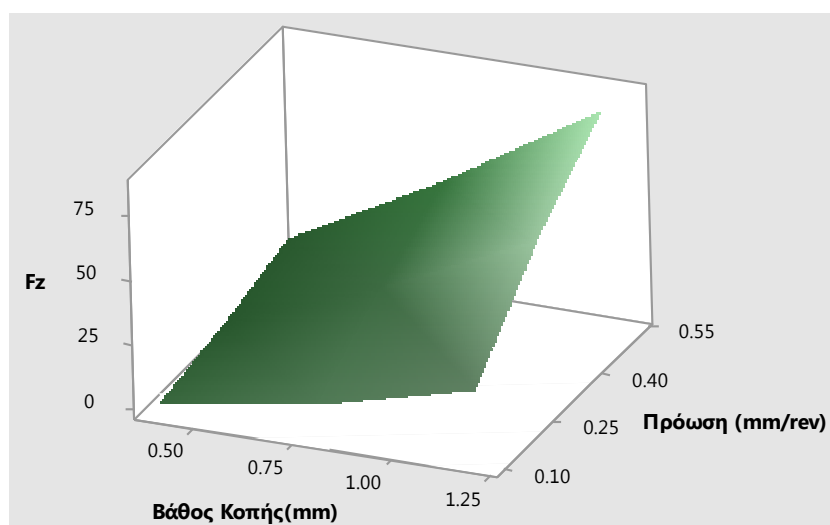
Εικόνα 4.19. Δύναμη στον γ- άξονα συναρτήσει της πρόωσης και του βάθους κοπής



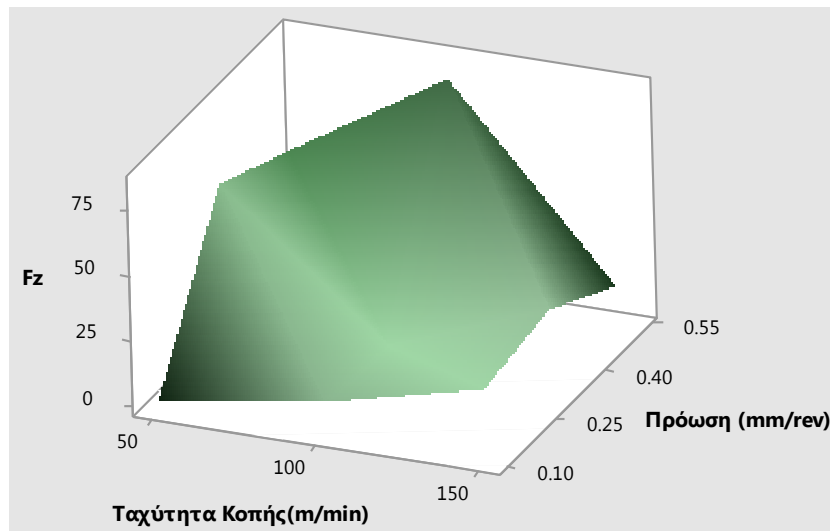
Εικόνα 4.20. Δύναμη στον γ- άξονα συναρτήσει της πρόωσης και της ταχύτητας κοπής



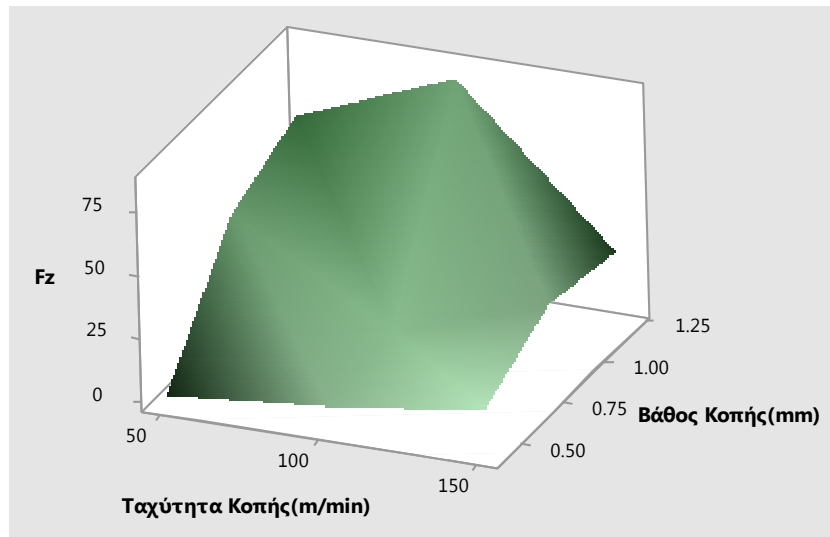
Εικόνα 4.21. Δύναμη στον γ- άξονα συναρτήσει της ταχύτητας κοπής και του βάθους κοπής



Εικόνα 4.22. Δύναμη στον z- άξονα συναρτήσει της πρόωσης και του βάθους κοπής



Εικόνα 4.23. Δύναμη στον z- άξονα συναρτήσει της πρόωσης και της ταχύτητας κοπής



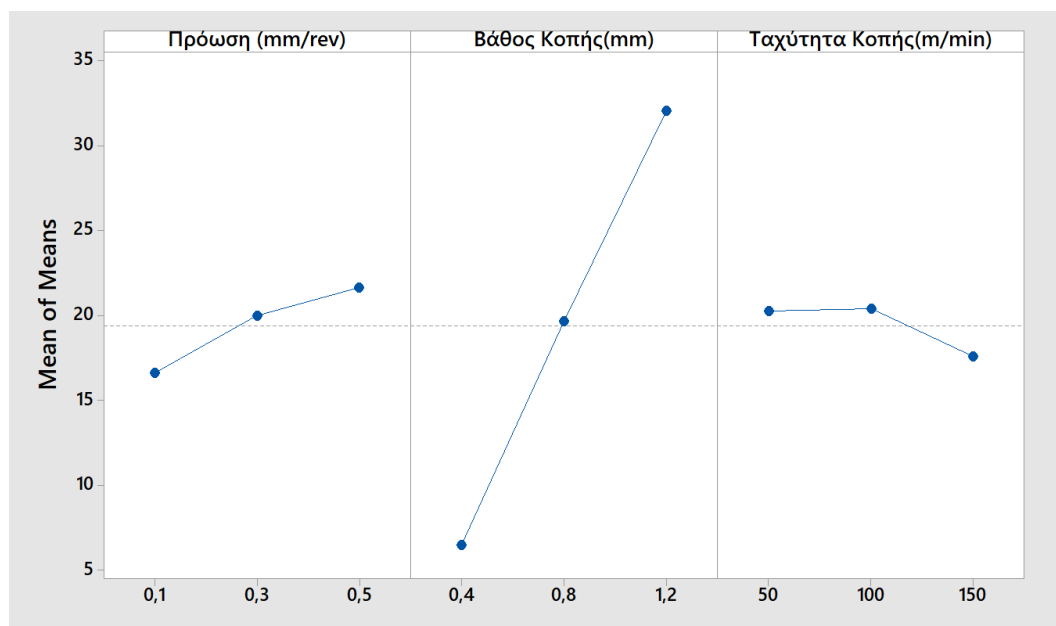
Εικόνα 4.24. Δύναμη στον z- άξονα συναρτήσει της ταχύτητας κοπής και του βάθους κοπής

4.3 Αποτελέσματα της ανάλυσης του signal-to-noise ratio

Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας κρίθηκε σκόπιμο να πραγματοποιηθεί και ανάλυση του signal-to-noise ratio, η οποία δείχνει ξεκάθαρα τη σημασία της κάθε μεταβλητής αλλά και τις βέλτιστες συνθήκες, οι οποίες για τη συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία είναι η ελαχιστοποίηση των δυνάμεων. Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης ανάλυσης παρουσιάζονται παρακάτω. Για τις F_x, F_z δυνάμεις βρέθηκε πως η πιο σημαντική παράμετρος είναι το βάθος κοπής, ακολουθεί η πρόωση και λιγότερο σημαντική είναι η ταχύτητα κοπής και για την F_y η πιο σημαντική είναι η πρόωση, ακολουθεί το βάθος κοπής και τέλος η ταχύτητα κοπής. Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της ανάλυσης παλινδρόμησης για τις περιπτώσεις εκείνες που υπήρχε ικανοποιητική συσχέτιση μεταξύ εξαρτημένων και ανεξάρτητων μεταβλητών.

Taguchi Analysis: Fx versus Πρόωση (mm/rev); Βάθος Κοπής(mm); Ταχύτητα Κοπής(m/min)			
Response Table for Signal to Noise Ratios			
Smaller is better			
Level	Πρόωση (mm/rev)	Βάθος Κοπής (mm)	Ταχύτητα Κοπής (m/min)
1	-23,03	-16,01	-24,48
2	-24,75	-25,78	-24,50
3	-24,06	-30,05	-22,87
Delta	1,72	14,04	1,63
Rank	2	1	3
Response Table for Means			
Level	Πρόωση (mm/rev)	Βάθος Κοπής (mm)	Ταχύτητα Κοπής (m/min)
1	16,616	6,461	20,235
2	19,970	19,679	20,383
3	21,627	32,073	17,595
Delta	5,011	25,612	2,788
Rank	2	1	3

Εικόνα 4.25. Αποτελέσματα της ανάλυσης του signal-to-noise ratio για το απλό μοντέλο, της δύναμης στον x-άξονα

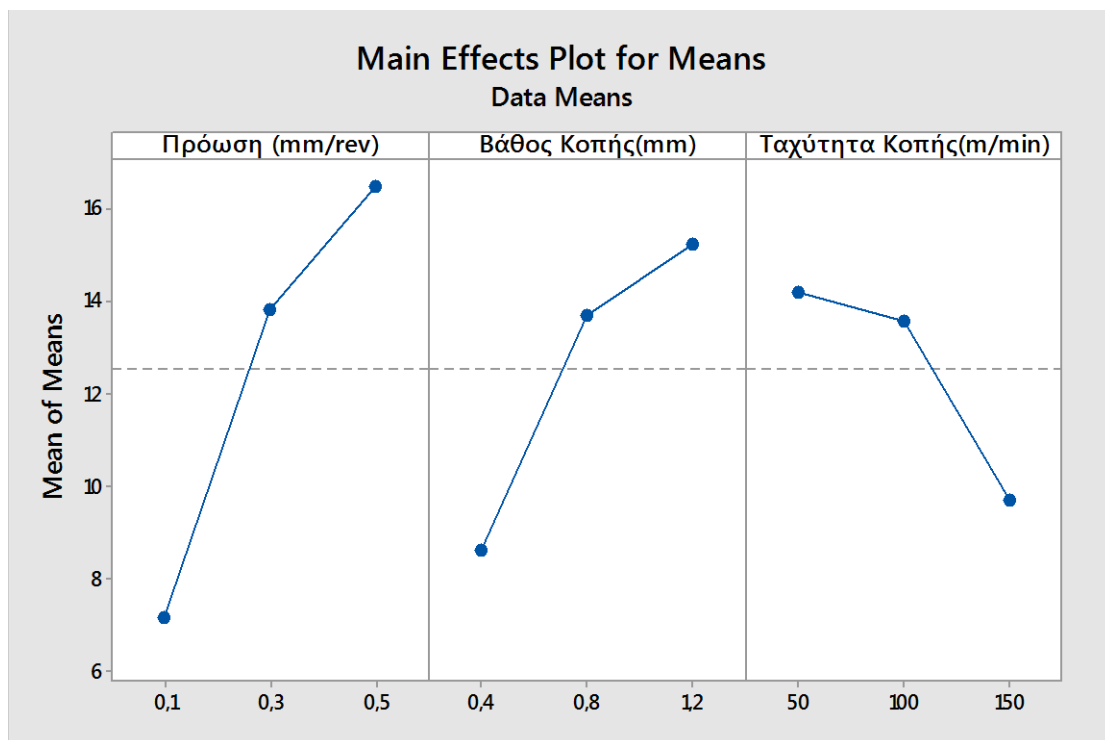


Εικόνα 4.26. Διάγραμμα της ανάλυσης του signal-to-noise ratio για το απλό μοντέλο, της δύναμης στον x-άξονα

Taguchi Analysis: Fy versus Πρόωση (mm/rev); Βάθος Κοπής(mm); Ταχύτητα Κοπής(m/min)			
Response Table for Signal to Noise Ratios			
Smaller is better			
Level	Πρόωση (mm/rev)	Βάθος Κοπής (mm)	Ταχύτητα Κοπής (m/min)
1	-17,13	-18,43	-22,20
2	-22,76	-21,96	-21,74
3	-23,43	-22,92	-19,38
Delta	6,30	4,49	2,82
Rank	1	2	3

Response Table for Means			
Level	Πρόωση (mm/rev)	Βάθος Κοπής (mm)	Ταχύτητα Κοπής (m/min)
1	7,203	8,623	14,232
2	13,840	13,702	13,606
3	16,514	15,232	9,719
Delta	9,311	6,609	4,513
Rank	1	2	3

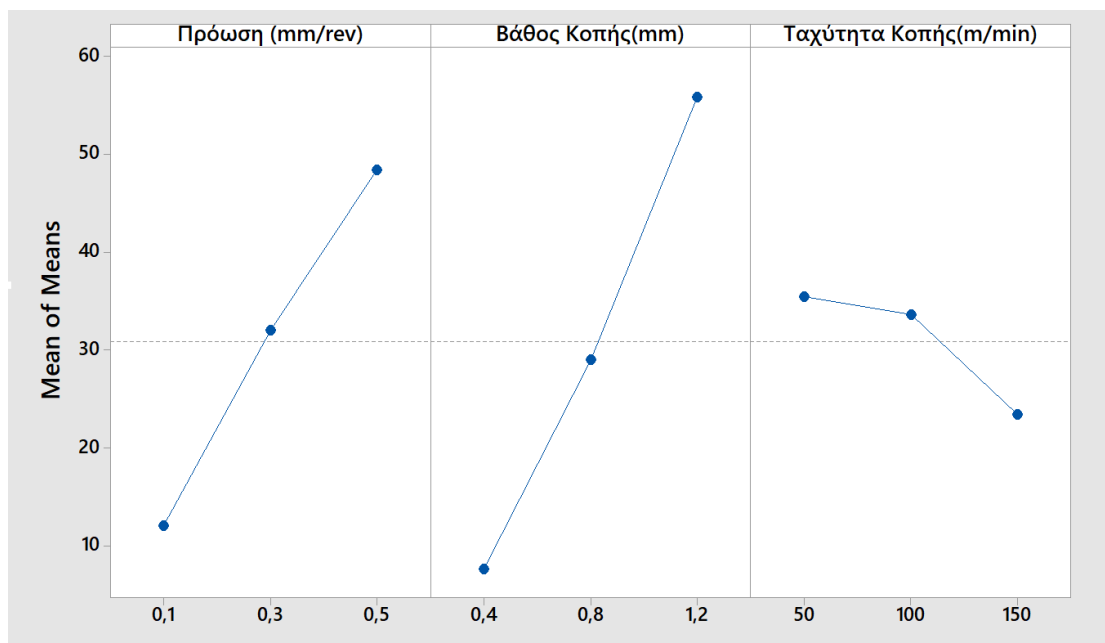
Εικόνα 4.27. Αποτελέσματα της ανάλυσης του signal-to-noise ratio για το απλό μοντέλο, της δύναμης στον γ-άξονα



Εικόνα 4.28. Διάγραμμα της ανάλυσης του signal-to-noise ratio για το απλό μοντέλο, της δύναμης στον γ-άξονα

Taguchi Analysis: Fz versus Πρόωση (mm/rev); Βάθος Κοπής(mm); Ταχύτητα Κοπής(m/min)			
Response Table for Signal to Noise Ratios			
Smaller is better			
Level	Πρόωση (mm/rev)	Βάθος Κοπής (mm)	Ταχύτητα Κοπής (m/min)
1	-16,32	-13,71	-23,22
2	-27,28	-27,70	-25,12
3	-31,75	-33,94	-27,01
Delta	15,43	20,23	3,79
Rank	2	1	3
Response Table for Means			
Level	Πρόωση (mm/rev)	Βάθος Κοπής (mm)	Ταχύτητα Κοπής (m/min)
1	12,069	7,604	35,460
2	32,005	29,045	33,660
3	48,453	55,878	23,407
Delta	36,384	48,274	12,052
Rank	2	1	3

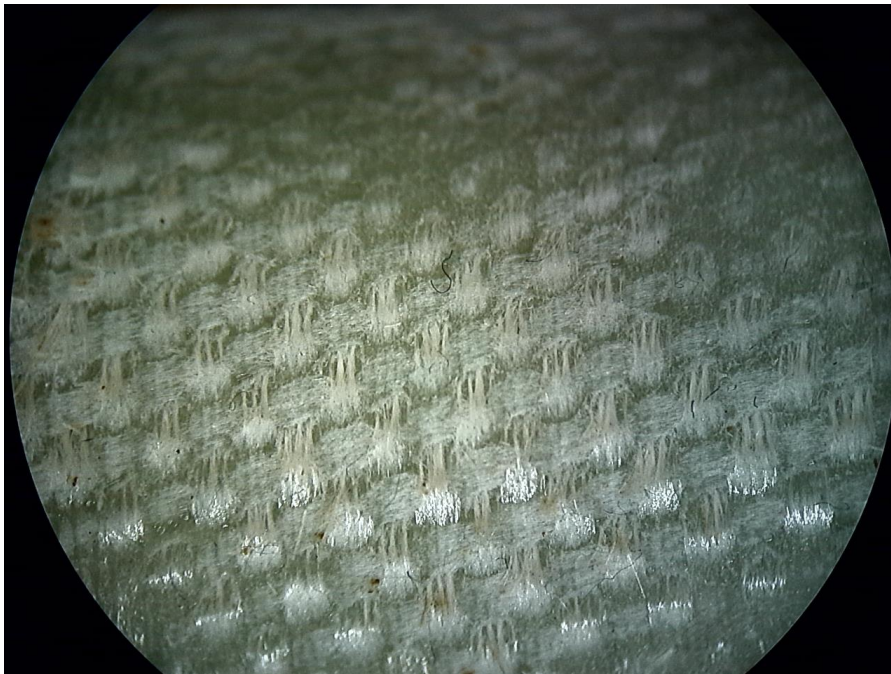
Εικόνα 4.29. Αποτελέσματα της ανάλυσης του signal-to-noise ratio για το απλό μοντέλο, της δύναμης στον z-άξονα



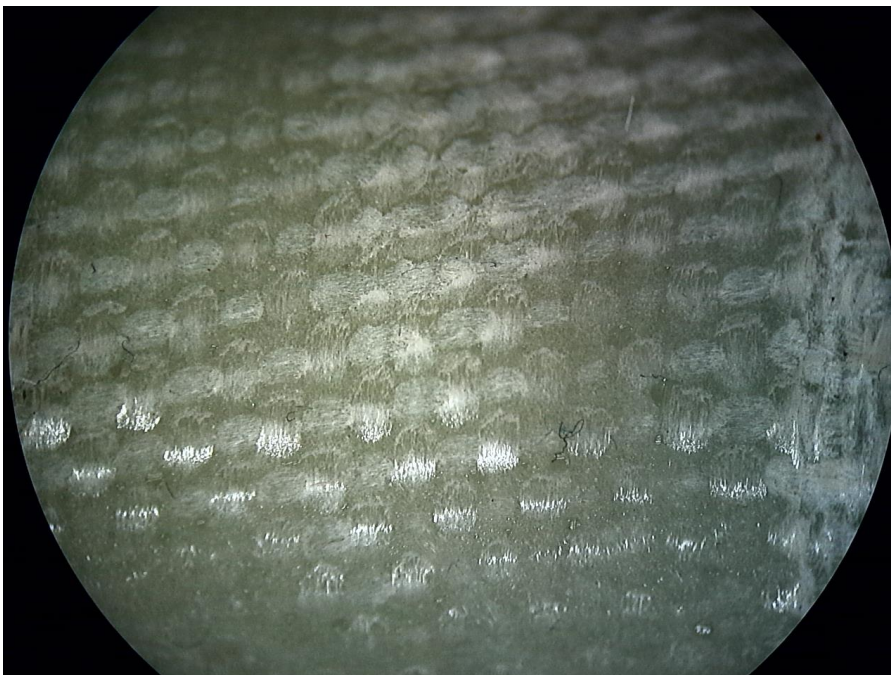
Εικόνα 4.30. Διάγραμμα της ανάλυσης του signal-to-noise ratio για το απλό μοντέλο, της δύναμης στον z-άξονα

4.4 Φωτογραφίες από το στερεοσκόπιο του υλικού μετά την τόννευση

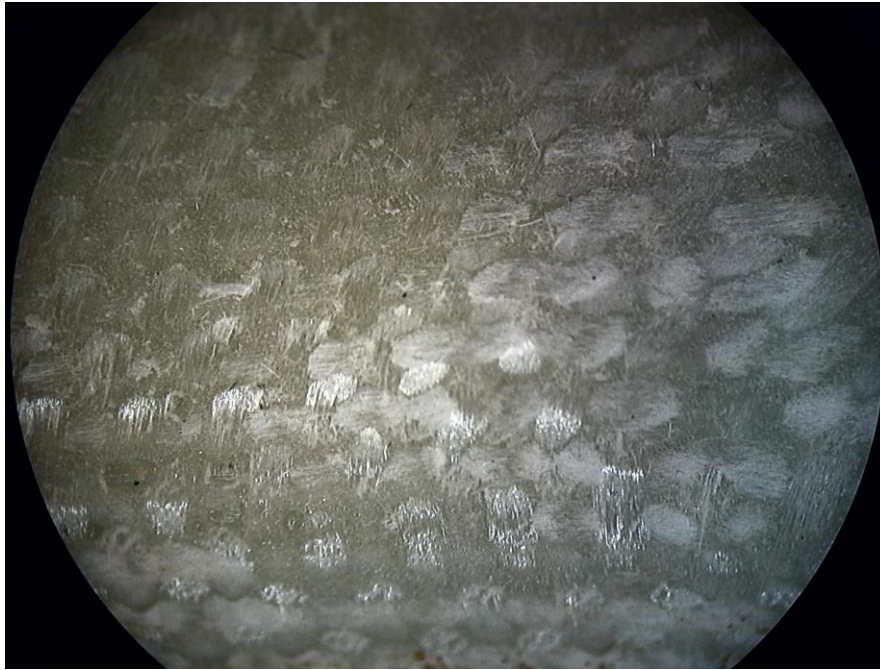
Παρακάτω παρουσιάζονται φωτογραφίες του υλικού από το στερεοσκόπιο.



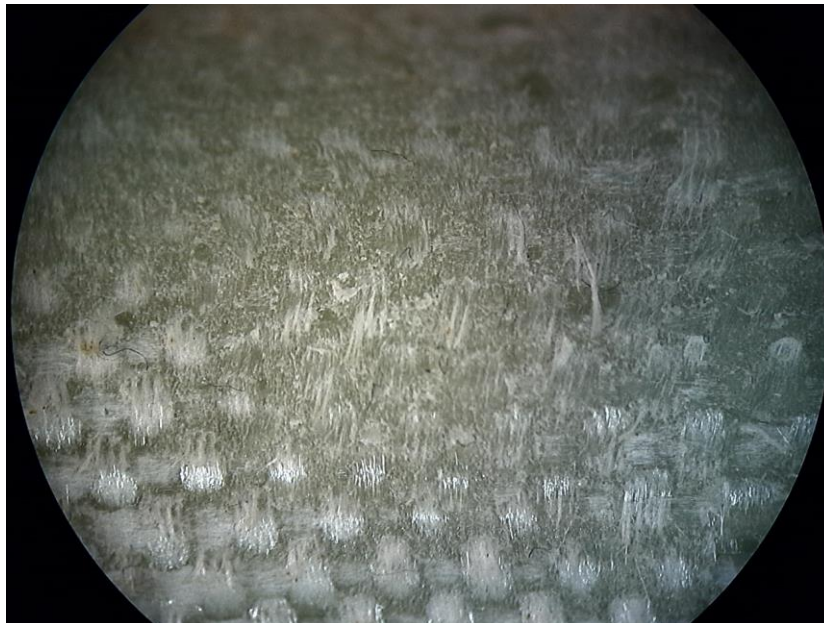
Εικόνα 4.31. Φωτογραφία του δοκιμίου κατεργασμένο σε μικρό βάθος κοπής και μεγαλύτερη πρόωση – Πείραμα 4



Εικόνα 4.32. Φωτογραφία του δοκιμίου κατεργασμένο σε μικρό βάθος κοπής και μικρή πρόωση – Πείραμα 1



Εικόνα 4.333. Φωτογραφία του δοκιμίου κατεργασμένο σε μεγάλο βάθος κοπής και μικρή πρόωση – Πείραμα 3



Εικόνα 4.344. Φωτογραφία του δοκιμίου κατεργασμένο σε μεγάλο βάθος κοπής και μεγάλη πρόωση – Πείραμα 6

Παρατηρούμε ότι τόσο η φορά των ινών όσο και η ποιότητα της επιφάνειας είναι καλύτερα στις κατεργασίες με μικρό βάθος κοπής ενώ σε αυτές με μεγάλο βάθος κοπής βλέπουμε ότι είναι χειρότερες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αντικείμενο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας ήταν η μελέτη των τριών δυνάμεων κοπής στους τρεις άξονες συντεταγμένων, των F_x , F_y και F_z . Οι παράμετροι που επηρεάζουν αυτές τις δυνάμεις είναι η πρόωση, το βάθος κοπής και η ταχύτητα κοπής. Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν παρουσιάστηκαν σε μορφή διαγραμμάτων συναρτήσεως του χρόνου και αναλύθηκαν με απώτερο σκοπό την εύρεση της επίδρασης κάθε μιας μεταβλητής στην τιμή των δυνάμεων. Η στατιστική ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων με το πρόγραμμα Minitab βοήθησε στην εύρεση της εξάρτησης των πειραματικών τιμών των δυνάμεων από τις παραμέτρους του πειράματος.

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε ανάλυση παλινδρόμησης (regression analysis) με το απλό μοντέλο, με ανεξάρτητες μεταβλητές το βάθος κοπής, την ταχύτητα κοπής και την πρόωση και εξαρτημένη μεταβλητή τη δύναμη. Καλή συσχέτιση εμφανίστηκε για τις δυνάμεις F_x και F_z . Η δύναμη F_x βρέθηκε πως εξαρτάται κυρίως από το βάθος κοπής, ακολουθεί η πρόωση και εξαρτάται λιγότερο από την ταχύτητα κοπής. Η δύναμη F_z εξαρτάται κυρίως από την πρόωση, ακολουθεί το βάθος κοπής και τέλος η ταχύτητα κοπής. Η παλινδρομική ανάλυση δεν έδωσε καλή συσχέτιση για την F_y , πιθανότατα λόγω του υψηλού θορύβου στον μετρητή του κοπτικού εργαλείου σε συνδιασμό με τις χαμηλές τιμές της δύναμης. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε ανάλυση παλινδρόμησης για το μοντέλο με επιπλέον όρο τα τετράγωνα των παραμέτρων και για το μοντέλο με τον επιπλέον όρο του τριπλού γινομένου των παραμέτρων. Η μεγαλύτερη συσχέτιση υπήρξε στο μοντέλο του τριπλού γινομένου το οποίο έδειξε πως οι δυνάμεις F_x και F_z επηρεάζονται κυρίως από το βάθος κοπής και ακολουθούν η πρόωση και η ταχύτητα κοπής. Η δύναμη F_y επηρεάζεται κυρίως από την πρόωση και ακολουθούν το βάθος κοπής και η ταχύτητα κοπής.

Ακολούθησε η ανάλυση signal-to-noise ratio (χαμηλότερη βέλτιστη- κεφ.1.3, εξ. 2), η οποία δείχνει ξεκάθαρα τη σημασία της κάθε μεταβλητής και τις βέλτιστες συνθήκες. Από αυτή την ανάλυση προέκυψε πως η πιο σημαντική παράμετρος είναι το βάθος κοπής, ακολουθεί η πρόωση και λιγότερο σημαντική από όλες είναι η ταχύτητα κοπής. Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της ανάλυσης παλινδρόμησης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Μανωλάκος Δ., Σημειώσεις Μαθήματος, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο.
- [2] Komanduri R., «Machining of Fiber-Reinforced Composites,» *Machining Science and Technology*, τόμ. 1, σελ. 113–152, 1997.
- [3] Dandekar, C. R., Shin Y. C., «Modeling of machining of composite materials: A review,» *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, τόμ. 57, σελ. 102-121, 2012.
- [4] Dietz A. G., *Composite Materials*, American Society for Testing and Materials, 1965.
- [5] Bagci, E., Ozcelik, B., «Analysis of temperature changes on the twist drill under different drilling conditions based on Taguchi method during dry drilling of Al7075-T651,» *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, τόμ. 29, σελ. 629–636, 2006.
- [6] Rosa, J. L., Robin, A., Silva, M. B., Baldan, C. A., Peres, M. P., «Electrodeposition of copper on titanium wires: Taguchi experimental design approach,» *Journal of Materials Processing Technology*, τόμ. 209, σελ. 1181–1188, 2009.
- [7] Kilickap E., «Optimization of cutting parameters on delamination based on Taguchi method during drilling of GFRP composite,» *Expert Systems with Applications*, τόμ. 37, αρ. 8, σελ. 6116-6122, 2010.
- [8] Mohan, N.S., Ramachandra, A., Kulkarni S.M., «Influence of process parameters on cutting force and torque during drilling of glass–fiber polyester reinforced composites,» *Composite Structures*, τόμ. 7, αρ. 3-4, σελ. 407-413, 2005.
- [9] Mohan, N. S., Kulkarni, S. M., Ramachandra, A., «Delamination analysis in drilling process of glass fiber reinforced plastic (GFRP) composite materials,» *Journal of Materials Processing Technology*, τόμ. 186, σελ. 265–271, 2007.
- [10] Montgomery D. C., *Design and analysis of experiments* (3rd ed.), New York: Arizona State University, 1991.
- [11] Petropoulos, G., Ntziantzas, I., Anghel, C. , «A predictive model of cutting force in turning using Taguchi and response surface techniques,» σε *1st International Conference on Experiments/Process/System Modelling/Simulation/Optimization – 1st IC EpsMsO*, Athens, 2005.
- [12] Phadke S., *Quality engineering using robust design*, Englewood Cliffs: N.J: Prentice Hall, 1989.
- [13] Taguchi G., *System of Experimental Design*, New York: UNIPUB, 1987.
- [14] Ross P. J., *Taguchi Techniques for Quality Engineering*, New York: McGraw-Hill, 1988.

- [15] Phadke M., Quality Engineering Using Robust Design (., Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1989.
- [16] Chao, P.Y. , Hwang, Y.D., «An improved Taguchi's method in design of experiments for milling CFRP composite,» *International Journal of Production Research*, τόμ. 35, αρ. 1, σελ. 51-66, 1997.
- [17] Takeyama, H., Iijima, N., «Machinability of Glassfiber Reinforced Plastics and Application of Ultrasonic Machining,» *CIRP Annals*, τόμ. 37, αρ. 1, σελ. 93-96, 1988.
- [18] Lee E.-S., «Precision Machining of Glass Fibre Reinforced Plastics with respect to Tool Characteristics,» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, τόμ. 17, αρ. 11, σελ. 791–798, 2001.
- [19] Chang C.-S., «Turning of glass–fiber reinforced plastics materials with chamfered main cutting edge carbide tools,» *Journal of Materials Processing Technology*, τόμ. 180, σελ. 117-129, 2006.
- [20] Gupta, M., Kumar, S., «Investigation of surface roughness and MRR for turning of UD-GFRP using PCA and Taguchi method,» *Engineering Science and Technology, an International Journal*, τόμ. 18, αρ. 1, σελ. 70-81, 2015.
- [21] Vasudevan H., Rajguru R., Tank K, Shetty N, «Optimization Of Multi-Performance Characteristics in the Turning Of GFRP(E) Composites using Principle Component Analysis combined with Grey Relational Analysis,» *Materials Today: Proceedings*, τόμ. 5, αρ. 2, σελ. 5955-5967, 2018.
- [22] Parida, A.K., Das, R., Sahoo, A.K., Routara, B.C., «Optimization of Cutting Parameters for Surface Roughness in Machining of gfrp Composites with Graphite/fly Ash Filler,» *Procedia Materials Science*, τόμ. 6, σελ. 1533-1538, 2014.
- [23] Parida, A.K. , Routara, B.C., Bhuyan, R.K., «Surface roughness model and parametric optimization in machining of GFRP composite: Taguchi and Response surface methodology approach,» *Materials Today: Proceedings*, τόμ. 2, αρ. 4-5, σελ. 3065-3074, 2015.
- [24] Sivasankaran, S., Harisagar, P.T., Saminathan, E., Siddharth, S., Sasikumar, P., «Effect of process parameters in surface roughness during turning of GFRP pipes using PCD insert tool,» *Procedia Engineering*, τόμ. 97, σελ. 64-71, 2014.
- [25] Vasudevan, H., Deshpande, N.C., Rajguru, R.R., «Grey Fuzzy Multiobjective Optimization of Process Parameters for CNC Turning of GFRP/Epoxy Composites,» *Procedia Engineering*, τόμ. 97, σελ. 85-94, 2014.
- [26] Sharma, S., Tamang, S., Devarasiddappa, D., Chandrasekran, M., «Fuzzy Logic Modeling and Multiple Performance Optimization in Turning GFRP Composites Using Desirability Function Analysis,» *Procedia Materials Science*, τόμ. 6, σελ. 1805-1814, 2014.

- [27] Vijaya Kini, M., Chincholkar, A.M., «Effect of machining parameters on surface roughness and material removal rate in finish turning of $\pm 30^\circ$ glass fibre reinforced polymer pipes,» *Materials & Design*, τόμ. 31, αρ. 7, σελ. 3590-3598, 2010.
- [28] Palanikumar K., «Modeling and analysis for surface roughness in machining glass fibre reinforced plastics using response surface methodology,» *Materials & Design*, τόμ. 28, αρ. 10, σελ. 2611-2618, 2007.
- [29] Palanikumar K, Karunamoorthy L, Karthikeyan R. , «Assessment of factors influencing surface roughness on the machining of glass fibre reinforced polymer Composites,» *Journal of Material Design*, τόμ. 27, σελ. 862-871, 2006.
- [30] Nayak D., Bhatnagar N., Mahajan P., «Machining studies of uni-directional glass fiber reinforced plastic (UD-GFRP) composites. Part 1: Effect of geometrical and process parameters,» *Machining Science and Technology*, τόμ. 9, σελ. 481–501, 2005.
- [31] Rao, G.V.G., Mahajan, P., Bhatnagar, N., «Machining of UD-GFRP composites chip formation mechanism,» *Composites Science and Technology*, τόμ. 67, αρ. 11-12, σελ. 2271–2281, 2007.
- [32] Davim, P., Mata, F., «New machinability study of glass fibre reinforced plastics using polycrystalline diamond and cemented carbide (K15) tools,» *Materials & Design*, τόμ. 28, αρ. 3, σελ. 1050–1054, 2007.
- [33] Palanikumar, K., «Application of Taguchi and response surface methodologies for surface roughness in machining glass fiber reinforced plastics by PCD tooling,» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, τόμ. 36, αρ. 1-2, σελ. 19–27, 2006.